引用格式：黄莺莺，吴聪，唐良颖，等.Cr添加对FeNi合金组织及磁性能影响[J].材料工程，2025，53(12)：193-199.
HUANG Yingying，WU Cong，TANG Liangying，et al.Effect of Cr addition on organization and magnetic properties of FeNi alloys[J].Journal of Materials Engineering，2025，53(12)：193-199.

Cr添加对FeNi合金组织及磁性能影响

Effect of Cr addition on organization and magnetic properties of FeNi alloys

黄莺莺[1]，吴 聪[2]，唐良颖[2]，刘华臣[2]，孔倩倩[1]，姚振华[1*]
（1 武汉理工大学 材料科学与工程学院，武汉 430070；
2 湖北中烟工业有限公司 工程中心，武汉 430040）
HUANG Yingying[1]，WU Cong[2]，TANG Liangying[2]，
LIU Huachen[2]，KONG Qianqian[1]，YAO Zhenhua[1*]
（1 School of Materials Science and Engineering，Wuhan University of Technology，Wuhan 430070，China；2 New Tobacco Products Engineering Center，China Tobacco Hubei Industrial Co.，Ltd.，Wuhan 430040，China）

摘要：为了降低铁镍系软磁合金材料的居里温度以改善其在烟具发热领域的温度适用性，本工作利用粉末冶金方法制备铁镍合金软磁材料，将不同成分的合金粉末经球磨混料后压制成型，并在1380 ℃和1400 ℃温度下进行真空烧结。采用X射线衍射仪（XRD）、电子探针显微分析仪、软磁直流B-H仪及PPMS等表征技术分析了Cr添加对FeNi合金组织性能的影响。结果表明：1400 ℃的烧结温度下制得的样品组织均匀致密，综合导磁性及导电性能更好。软磁材料磁性能和成分密切相关，Cr元素的加入使得铁镍合金致密度以及硬度均得到提高，也使得铁镍合金的电阻率升高，同时磁导率减小，居里温度明显降低。

关键词：粉末冶金；软磁材料；致密度；磁性能；导电性
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2023.000664 **CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2023.000664
中图分类号：TF12 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-4381(2025)12-0193-07

Abstract：To reduce the Curie temperature of iron-nickel soft magnetic alloy materials and improve their temperature applicability in the field of smoke heating，powder metallurgy is used to prepare iron-nickel alloy soft magnetic materials. The alloy powder of different components is pressed by ball grinding mixture and vacuum sintering at 1380 ℃ and 1400 ℃. The influence of Cr addition on the tissue properties of FeNi alloy is analyzed by X-ray diffractometer（XRD），electron probe microanalyzer，soft magnetic DC B-H meter，and PPMS. The results show that the samples produced at a sintering temperature of 1400 ℃ have a uniform and dense organization with better comprehensive magnetic and electrical conductivity. The magnetic performance of soft magnetic materials is closely related to the composition. The addition of Cr improves the density and hardness of FeNi alloys，together increases the resistivity of FeNi alloys，while decreases the magnetic permeability and the Curie temperature significantly.

Key words：powder metallurgy；soft magnetic material；density；magnetic performance；electrical conductivity

铁镍系软磁合金，因为其优异的磁学和电学特性在电磁感应加热领域具有极大的发展潜力。将电磁加热技术应用到烟具加热领域，可用于研制加热不燃烧烟草制品（HNB），以期改善烟具的加热性能[1]。此类发热元件的研制对铁镍软磁合金提出了新的要求，元件要求形状小型化、尺寸精度高、具有良好的抗腐

蚀性能，能够匹配加热烟支的发热温度，并且发热体的预热时间不超过 20 s。不同烟草材料中的尼古丁和大部分致香物质在加热温度 300 ℃左右时释放量基本达到最大，采用中心加热方式时，发热元件的工作温度一般不高于 350 ℃，因此应控制加热体系的感应居里温度在 280～350 ℃范围[2]。

牛淑洁[3]采用理论分析、仿真计算、实验测试三者相结合的技术手段，研究了基于感应加热技术的加热卷烟加热器的设计，研究表明：1j50 系铁镍合金加热效率高，更适合作为发热元件的制作材料。然而此类铁镍合金的居里温度在 500 ℃左右，无法完全满足对烟支发热温度的控制，因此需考虑在保证一定发热效率的情况下，通过成分优化的手段使其居里温度适当地下降至 350 ℃左右。在 1j50 铁镍合金的基础上，加入 Mo、Cu、Si、Cr 等元素可以提高合金的硬度，增大电阻率，或通过对磁性的抑制作用改变材料的居里温度[4]。当在 FeNi 合金中加入其他元素使居里温度降低的同时，也使饱和磁化强度等磁性能明显下降，因此一般加入元素的含量都不宜过多[5]。粉末冶金是解决上述问题的一种有效方法。粉末冶金可利用金属、合金或非金属粉末的组合效果，设计并适当控制各种组元在材料中的分布和材料的微观结构，从而使材料表现出不同的特性[6]。

本工作以 1j50 粉和 Cr 粉为原料，制备不同成分的铁镍合金粉末，采用传统粉末冶金工艺中的压制成型工艺制备铁镍软磁合金，再分别采用不同的烧结温度进行真空烧结，表征合金样品的物相组成与微观形貌。为了进一步降低铁镍软磁合金的居里温度以实现对发热温度的控制，研究了 Cr 元素的添加对铁镍软磁合金致密度、晶粒尺寸和磁性能的影响。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料的制备工艺

以 1j50 粉（成分为 $Fe_{50}Ni_{50}$，粒度 500 目，纯度≥99.8%）、Cr 粉（粒度 500 目，纯度≥99.0%）为原料，以 Cr 元素含量为变量，设计 3 组合金成分如表 1 所示。

表 1 实验原料成分设计（质量分数/%）

Table 1 Compositional design of test materials (mass fraction/%)

Serial number	1j50	Cr
A	100	0
B	99.5	0.5
C	99	1

本实验采用粉末冶金工艺，其中步骤包括配料与球磨、烘干与过筛、压制、烧结等。使用 XGB4 行星式球磨机进行球磨混料，使用 6～20 mm 的不锈钢磨球，球料比为 7∶1，以乙醇为添加剂，球磨转速为 250 r/m，球磨 24 h 后，将粉末烘干过筛。使用 SB 手扳式制样机将粉末压制成型，其中压力为 300 MPa，保压时间为 60 s。在 TL1600 真空管式炉中进行烧结，设置 1380 ℃和 1400 ℃的两组烧结温度，保温时间为 3 h。

1.2 测试方法

对试样进行逐级打磨后抛光，在金相显微镜下观察样品金相组织。使用 D8 Advance 型 X 射线衍射仪（XRD）分别对合金样品进行成分分析，并利用 JXA-8230 电子探针显微分析仪附加 INCA X-Act 能谱仪对试样进行 EDS 点扫描和面扫描，进而分析合金样品的元素扩散情况。用阿基米德排水法测量所制备铁镍合金的密度，采用 HR-150 A 型洛氏硬度计测量试样的洛氏硬度（HRA），将试样平放在硬度计的载物台上，加载载荷为 588 N，保压时间为 15 s，测试 5 次，相邻两个测试点间距不少 2 mm，取平均值为试样的洛氏硬度值。通过 FE-2100 SD 软磁直流 B-H 仪，测量材料的磁特性。使用综合物性测量系统（PPMS）测量合金样品的 *M-T* 曲线及电阻率。

2 结果与分析

2.1 烧结 FeNi 合金物相分析

图 1 为 1400 ℃烧结温度下烧结样品 XRD 衍射图，可明显看出，烧结前添加 1%（质量分数，下同）Cr 的混合粉末中存在 Cr 的衍射峰，烧结之后纯 Cr 的衍射峰消失，标志着合金化的完成，元素之间发生良好的固溶反应，按照成分设计，生成了相应的合金，未生产其他物质，Cr 加入后 $Fe_{50}Ni_{50}$ 的衍射峰向高角度有小幅度的偏移[7]。放大 1000 倍不同成分样品背散射图如图 2 所示，由图可见烧结体中存在一些细小的孔洞，

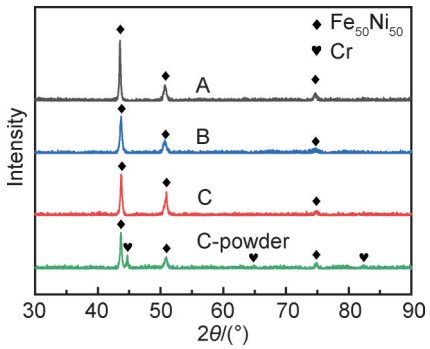


图 1 粉末及 1400 ℃烧结体 XRD 衍射图

Fig.1 XRD patterns of powders and samples of sintered at 1400 ℃

无明显的第二相粒子，由此说明烧结体已达到合金化，形成单一物相。此外孔隙对磁导率的影响很大，例如，最大磁导率主要取决于孔隙形状，退磁场的大小和颗粒表面平滑程度有关，因而孔隙形状以接近球形为宜，孔隙表面凹凸部分越少，形状越为均匀，其对磁体磁导率的影响就越小；同时，孔隙也会阻碍磁畴壁的迁移，从而降低最大磁导率[8]。由图2可见，A组烧结试样孔隙体积小且数量少，边缘平滑，深度较低，多呈球状，较为理想，图2(a)B、C两组几乎看不到明显的孔隙，试样的烧结致密性好(图2(b)～(c))，说明Cr元素的加入有助于消除孔隙，改善材料的烧结性能。



图2　1400 ℃烧结温度下不同组别合金的背散射图
(a)A组样品；(b)B组样品；(c) C组样品

Fig.2　Backscattering diagrams of different groups of alloys at 1400 ℃ sintering temperature
(a)group A samples; (b)group B samples; (c)group C samples

图3为C组样品的元素分布图，样品中Fe、Ni、Cr元素均匀分布，说明烧结得到了均匀的合金组织，Cr充分固溶到FeNi合金中。根据图4和表2显示，C组合金样品总体上基本符合预设的元素比例，由此可以判断出烧结出的合金样品成分符合预期，并且孔隙少，样品质量良好。

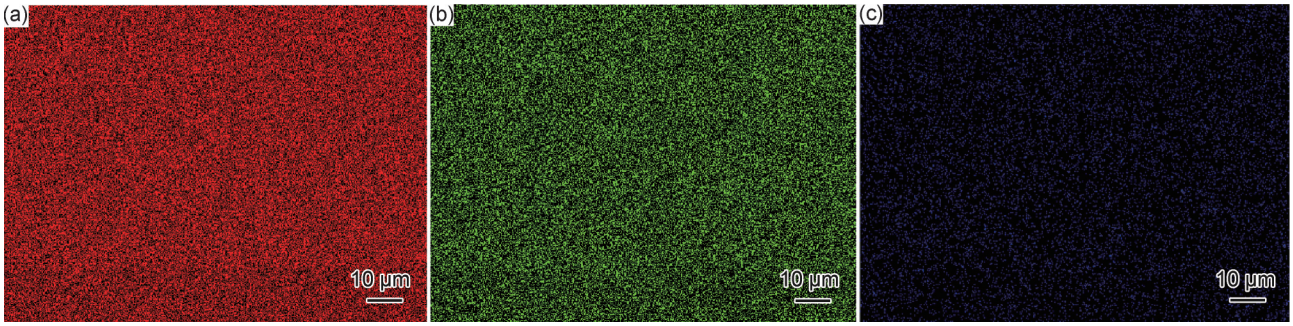


图3　1400 ℃烧结温度下C组样品中不同元素分布图
(a)Fe；(b)Ni；(c)Cr

Fig.3　Distribution of different elements in group C samples at 1400 ℃ sintering temperature
(a)Fe; (b)Ni; (c)Cr

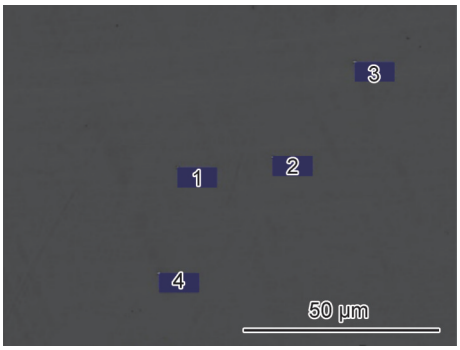


图4　1400 ℃烧结C组样品元素采集图谱

Fig.4　Elemental mapping of group C samples sintering at 1400 ℃

表2　实验原料成分设计1400 ℃烧结合金C组样品中元素含量(质量分数/%)

Table 2　Elemental content of group C samples at 1400 ℃ sintering temperature (mass fraction/%)

Spectrogram	Cr	Fe	Ni
1	0.99	52.40	46.61
2	1.04	49.91	49.05
3	0.91	50.82	48.28
4	0.94	50.12	48.93
Average	0.97	50.81	48.22

2.2 Cr添加对FeNi合金微观组织影响

在1380 ℃和1400 ℃温度下烧结的A组$Fe_{50}Ni_{50}$样品金相(100倍)如图5所示。晶核的生长和晶粒的长大会受到杂质及晶体缺陷的影响,此类影响的存在会使晶格发生畸变,使得合金磁导率降低,同时矫顽力增大[9]。从图中可以看到经过高温真空烧结制备的合金不规则孔洞数量少,样品致密度较高,合金为铁素体晶粒,晶粒为等轴状的多边形结构,晶粒饱满且晶界清晰,晶体缺陷相比较少。对比分析,图5(a)中1380 ℃烧结的样品平均晶粒尺寸为200 μm左右,大尺寸晶粒周围还存在一些细小的晶粒,图5(b)中1400 ℃烧结的样品平均晶粒尺寸为300 μm左右,细小的晶粒几乎消失不见,晶粒更加均匀且更加饱满,这是由于随着烧结温度的升高,烧结推动力提高,有助于粉末颗粒的接触和扩散,晶界移动速率加大,晶粒尺寸也随之增大[10]。

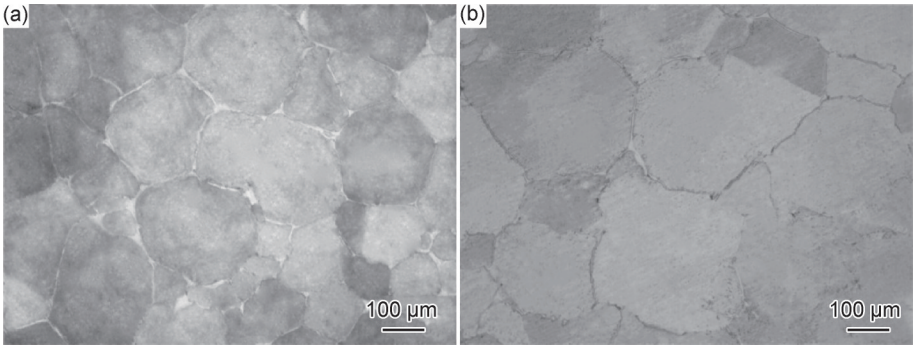


图5 1380 ℃(a)、1400 ℃(b)烧结温度下A组样品的金相

Fig.5 Metallography of group A samples at 1380 ℃(a) and 1400 ℃(b) sintering temperature

取$Fe_{50}Ni_{50}$成分加入Cr元素的样品在1400 ℃温度下进行烧结,将制成的样品与未加Cr的样品进行对比,在1400 ℃温度下烧结的合金样品金相(100倍)如图6所示。从图中可以观察到合金为铁素体晶粒,晶粒为等轴状的多边形结构,晶粒饱满且晶界清晰,图6(a)中晶粒大小均匀,图6(b)~(c)中Cr元素加入后组织不均匀程度增加,细小的晶粒增多,形成明显的混晶组织,晶界的体积分数增大,说明Cr加入后晶体缺陷增多,晶核生长和晶粒长大过程完成得并不充分。

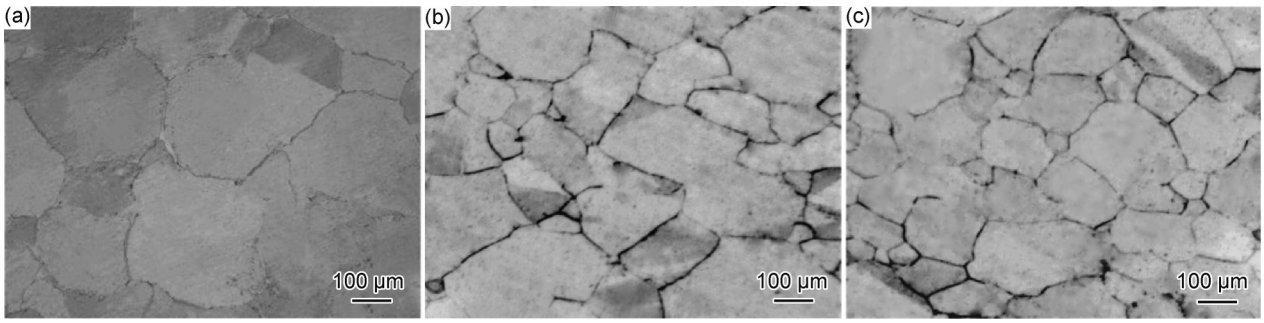


图6 1400 ℃烧结温度下不同组别合金的金相

(a)A组样品;(b)B组样品;(c)C组样品

Fig.6 Metallography of different groups of alloys at 1400 ℃ sintering temperature

(a)group A samples;(b)group B samples;(c)group C samples

2.3 Cr添加对FeNi合金性能影响

不同烧结温度下,各成分的相对密度如表3所示,经分析由此工艺路线制备出的铁镍合金相对密度稳定在95%左右。粉末冶金方法制备磁性材料的主要缺点是材料中存在的残余孔隙会干扰磁场,影响材料性能,而高温烧结会使材料密度增加、孔隙减少,从而提高磁性能[11]。在这两种温度制备工艺下,$Fe_{50}Ni_{50}$在1380 ℃烧结后制得的样品的相对密度达到94.41%,1400 ℃烧结样品的相对密度更高,达到94.76%。由此说明烧结温度的提高能够促进原子迁移运动和颗粒之间发生黏结,吸附气体从气孔中逸出,有助于消除气孔,能够使烧坯的致密度得到提高。1400 ℃烧结时,加入Cr元素后,$Fe_{50}Ni_{50}$的相对密度由94.76%上升至97%以上。

表3　不同烧结温度下样品相对密度

Table 3　Relative density of samples at different sintering temperatures

Serial number	Relative density/%	
	1400 ℃	1380 ℃
A	94.76	94.16
B	97.10	96.26
C	97.04	96.52

测得试样的洛氏硬度(HRA)结果如表4所示，由表中可见$Fe_{50}Ni_{50}$在1380 ℃烧结后的硬度较1400 ℃烧结更高，用此类制备工艺制得的铁镍合金硬度水平基本维持在30 HRA左右。加入Cr元素后，$Fe_{50}Ni_{50}$的硬度上升至40 HRA以上。在Cr含量0.5%～1%范围内，合金硬度水平变化很小。结合金相组织分析，Cr加入后，晶粒尺寸减小，细小的晶粒增多，原合金材料晶体的晶格发生了畸变，使得晶体滑移阻力增大[12]，产生了固溶强化的作用，对铁镍合金致密度以及硬度的提高均起到了促进的作用。

表4　不同烧结温度下样品的洛氏硬度(HRA)

Table 4　Rockwell hardness of samples at different sintering temperatures (HRA)

Serial number	1400 ℃	1380 ℃
A	27.8	31.8
B	42.5	41.8
C	40	45.5

测得1400 ℃烧结温度下A组$Fe_{50}Ni_{50}$样品磁滞回线如图7所示，由图可见样品拥有完整的磁滞回线，且形状窄长，窄长磁滞回线是软磁材料的重要特点，起始磁化曲线的斜率高，说明材料具有高的磁导率，图中样品表现出明显的磁滞现象，具有良好的铁磁性[13]。

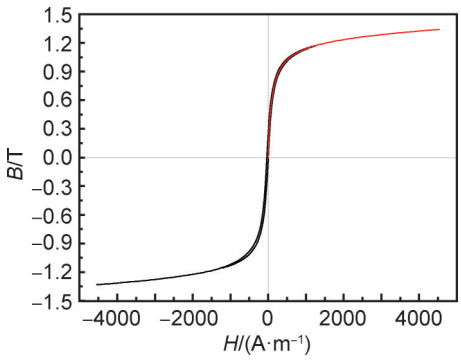


图7　1400 ℃烧结温度下A组样品磁滞回线

Fig.7　Hysteresis lines of group A samples at 1400 ℃ sintering temperature

测得各项软磁性能数据如表5所示。可以看出1400 ℃烧结温度下3种成分样品的初始磁导率μ_i及最大磁导率μ_m均高于1380 ℃烧结的样品，影响合金磁导率的因素有很多，元素成分、晶体织构都与原子有序化和内应力密切相关，孔隙大小、形状和个数也关系到样品的致密度和晶体缺陷，如空位、位错、晶界(包括孪晶界)、夹杂物等，晶体中的各种缺陷相对磁畴畴壁有钉扎作用，会影响磁畴在晶体中的运动，从而影响合金的磁性能[14]。由矫顽力H_c的晶体缺陷理论，当畴壁的厚度比缺陷尺寸小时，此类影响更为明显，缺陷对畴壁的钉扎作用更大[15]。适当提高烧结温度，晶核生长和晶粒长大更为充分，位错密度会降低，晶内孪晶数量减少，孪晶尺寸变大，晶界减少，减弱了对畴壁的钉扎作用，从而提高磁性能[14,16]。前文测得1400 ℃烧结样品的致密度较1380 ℃的更高，孔隙对磁导率的影响更小，1400 ℃烧结的样品平均晶粒尺寸较1380 ℃的更大，晶粒更加均匀饱满，晶界数量更少，晶界对磁畴钉扎作用的更小。饱和磁感应强度B_s也是磁性材料的一项重要性能指标，它属于非结构敏感量，主要取决于材料的化学组成及密度，几乎不受制备工艺及晶粒组织的影响[17]。当成分为$Fe_{50}Ni_{50}$时，1400 ℃烧结的样品B_s较1380 ℃的更高，达到1.458 T。

表5　铁镍软磁合金软磁性能数据

Table 5　Soft magnetic properties data for iron-nickel soft magnetic alloys

Sintering temperature-ingredient	μ_i/(mH·m^{-1})	μ_m/(mH·m^{-1})	B_s/T	H_c/(A·m^{-1})
1400 ℃-A	2.244	5.267	1.458	19.99
1380 ℃-A	1.885	3.493	1.332	11.04
1400 ℃-B	1.326	3.613	1.414	19.75
1380 ℃-B	1.169	2.893	1.242	40.50
1400 ℃-C	1.032	2.371	1.386	27.16
1380 ℃-C	1.018	2.292	1.173	40.74

取$Fe_{50}Ni_{50}$成分加入Cr元素的样品在2种温度下进行烧结，将制成的样品与未加Cr的样品进行对比，各项软磁性能数据如表5所示。矫顽力H_c是结构敏感量，成分、磁粉粒度和烧结条件等因素均具有重要的影响，由表中可见在3种成分下的铁镍合金均显示了较低的矫顽力。在1400 ℃温度下烧结时，随着Cr元素含量的增加，样品的μ_i及μ_m均有明显减小，当Cr含量从0增加到0.5%时，μ_i从2.244 mH/m降至1.326 mH/m，μ_m从5.267 mH/m降至3.613 mH/m，降幅显著；B_s随着Cr元素含量的增加而略有降低；H_c在Cr含量为0.5%时变化不大，与未加Cr的样品水平相近，Cr含量为1%时H_c增大至27.16 A/m。这是由于Cr是反

铁磁性元素，Fe、Ni的铁磁性主要来源于电子的轨道和自旋运动产生的磁矩，反铁磁性元素Cr的加入可以降低铁磁性原子间的磁交换作用[18]，使得Fe、Ni元素的铁磁性被有效地抑制。同时前文测得Cr元素加入后组织的均匀程度降低，细小的晶粒增多，晶界的体积分数增大，晶体缺陷增多，缺陷对磁畴畴壁的钉扎作用增强，表现为合金的磁性受到较大的影响，磁导率的降低显著。

利用铁磁材料的磁化曲线，即磁化强度M随温度T的变化曲线来测定居里温度。烧结铁镍合金样品的M-T磁化曲线如图8所示，每3 ℃设置1个测量点。铁磁材料在居里温度时将会有从铁磁态向顺磁态的相转变，在低于居里温度时，磁化强度M随温度T的增加而逐渐减小[19]。居里温度非结构敏感量，它仅与材料的化学成分和晶体结构有关，与晶粒的大小、取向以及应力分布等组织结构因素无关[20]，亦与制备工艺无关。加入Cr后$Fe_{50}Ni_{50}$的居里温度明显降低，测得A成分的居里温度约为500 ℃，B成分的居里温度约为413 ℃，C成分的居里温度约为390 ℃，这同样是由于反铁磁性元素Cr的加入使得Fe、Ni元素的铁磁性被抑制，并且这种影响在居里温度上充分地体现出来，表现为合金样品在更低的温度即可到达磁性转变点。

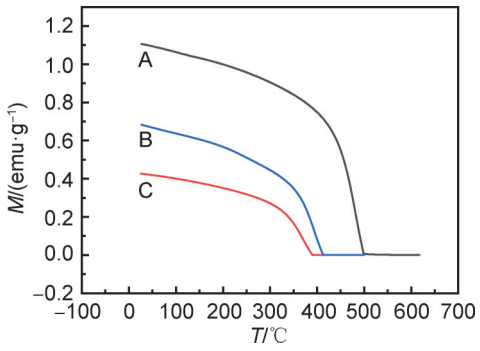


图8 不同成分铁镍合金样品的M-T曲线

Fig.8 M-T curves of Fe-Ni alloy samples with different compositions

测得样品的电阻率数据如图9所示，可见1400 ℃烧结温度下3种成分样品电阻率较1380 ℃更小。加入Cr后随Cr含量的增加，电阻率增大。经过计算得到样品电导率的数据如表6所示，1400 ℃下$Fe_{50}Ni_{50}$样品导电性能更好。一方面，由于烧结温度的提高，铁镍软磁合金的孔隙率降低，致密度提高，不利于导电性的空气对合金的影响小，合金的导电性更好。另一方面，烧结温度1380 ℃烧结的样品平均晶粒尺寸小于1400 ℃的样品平均晶粒尺寸，晶界的体积分数更大，由于晶界旁边通常都分布着点缺陷和位错等晶体缺陷，对电子的散射作用更明显，因此较低温度制得的样品的电阻率更大。随Cr含量的增加，电导率逐渐减小，这是由于铁镍铬元素导电性排序为Ni>Fe>Cr，Cr的导电性能不如铁镍，当Cr元素加入$Fe_{50}Ni_{50}$中，导电性差的原子比例增多，同时也使得FeNi合金原子原有的平衡态被破坏，发生晶格畸变，因而合金样品的电阻率增加，导电性能下降。

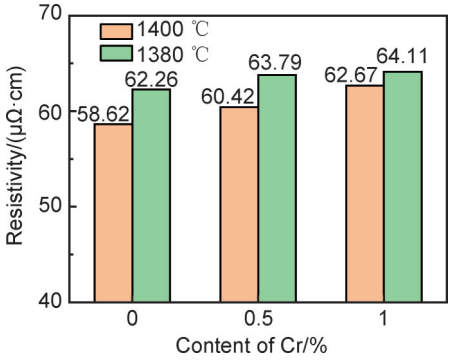


图9 不同烧结温度下不同成分样品的电阻率数据

Fig.9 Resistivity data for samples of different compositions at different sintering temperatures

表6 不同烧结温度下样品的电导率数据

Table 6 Conductivity data of samples at different sintering temperatures

Serial number	Conductivity/(10^6 S·m^{-1})	
	1400 ℃	1380 ℃
A	1.706	1.606
B	1.655	1.568
C	1.596	1.560

3 结论

(1)按照所设计的成分成功制备Fe-Ni软磁合金，并对所制备的样品进行了组织分析、成分分析与力学、磁学、电学性能表征。制得的合金致密度良好，组织均匀，具有完整的磁滞回线。

(2)得到的$Fe_{50}Ni_{50}$在1400 ℃温度下进行真空烧结性能更佳，保温时间为3 h。在此工艺路线下制得的样品致密度更高，晶粒饱满，组织更加均匀，综合导磁性及导电性能更好，且设计成分范围内的铁镍合金均显示了较高的饱和磁感应强度和较低的矫顽力。

(3)Cr元素的加入使得FeNi合金致密度以及硬度均得到提高，也使得FeNi合金的电阻率小幅升高。Cr元素对FeNi合金磁性的抑制作用显著，随着Cr元素含量的增加，样品的μ_i及μ_m均有明显减小，居里温度明显降低，其中C组(Cr含量1%)的居里温度为

390 ℃，较$Fe_{50}Ni_{50}$降低了110 ℃，B_s随着Cr元素含量的增加而略有降低；H_c在Cr含量为1%时明显增大至27.16 A/m。

参考文献

[1] 孙玲. 电磁感应式加热卷烟烟具测温技术研究[D].昆明：昆明理工大学，2021.
SUN L.Research on temperature measurement technology of electromagnetic induction heating cigarette smoking equipment [D]. Kunming：Kunming University of Technology，2021.

[2] 时春鑫，郑绪东，吴建德，等.加热卷烟加热元件温度场分析及试验研究[J].烟草科技，2020，53(11)：89-96.
SHI C X，ZHENG X D，WU J D，et al.Analysis and experimental research on temperature field of heating element for heated tobacco products[J].Tobacco Science & Technology，2020，53(11)：89-96.

[3] 牛淑洁.加热卷烟电磁感应式加热器的设计与仿真研究[D].昆明：昆明理工大学，2020.
NIU S J.Design and simulation study of electromagnetic induction heater for heating cigarettes[D].Kunming：Kunming University of Technology，2020.

[4] 曹云飞.Fe-Ni基低居里点铁磁材料的制备及性能研究[D].天津：河北工业大学，2022.
CAO Y F.Preparation and performance study of Fe-Ni based low curie point ferromagnetic materials[D].Tianjin：Hebei university of technology，2022.

[5] LIU J R，LI Z B，CHEN B，et al.Effect of Ni/Fe ratio on activation sintering and mechanical properties of molybdenum nickel iron alloy [J].Journal of Central South University，2022，29(5)：1423-1436.

[6] 彭登奎，刘草生，田成林，等.基于模糊PID控制的粉末冶金压机结构设计[J].机械设计与制造工程，2020，49(6)：52-56.
PENG D K，LIU C S，TIAN C L，et al.Structural design of powder metallurgy press based on fuzzy PID control[J].Machine Design and Manufacturing Engineering，2020，49(6)：52-56.

[7] 岳洋，杜勇，吕健，等.Ti(C，N)-TaC-Ni金属陶瓷真空烧结过程的微观结构演变与性能的研究[J].硬质合金，2022，39(1)：1-11.
YUE Y，DU Y，LYU J，et al.Microstructure evolution and properties of Ti(CN)-TaC-Ni cermet during vacuum sintering[J].Cemented Carbides，2022，39(1)：1-11.

[8] GHEISARI K，OH J T，JAVADPOUR S. The effect of heat treatment on the structure and magnetic properties of mechanically alloyed Fe-45%Ni nanostructured powders[J].Journal of Alloys and Compounds，2011，509(3)：1020-1024.

[9] 张燕阳，王德义，詹晓梅，等.不同热处理方法对1J50合金软磁性能影响研究[J].材料开发与应用，2012，27(2)：24-27.
ZHANG Y Y，WANG D Y，ZHAN X M，et al.Study on the effect of different heat treatment methods on the soft magnetic properties of 1J50 alloy[J].Development and Application of Materials，2012，27(2)：24-27.

[10] SINGH N，BANERJEE S，PARKASH O，et al. Structural and mechanical behaviour of Fe-30Ni alloy produced by a powder metallurgy route [J]. Transactions of the Indian Ceramic Society，2017，76(1)：38-42.

[11] ALI M，AHMAD F，MALIK M R R，et al.Fabrication of high magnetic performance Fe-50Ni alloy by powder injection molding [J].Materials and Manufacturing Processes，2020，35(14)：1557-1566.

[12] ZAPF G. The mechanical properties of hot-recompacted iron-nickel sintered alloys [J]. Powder Metallurgy，2014，13 (26)：130-155.

[13] 张富臣，李红梅，景宗福，等.铁磁钢材应力致磁各向异性定量检测特性研究[J].华中科技大学学报(自然科学版)，2019，47(5)：22-26.
ZHANG F C，LI H M，JING Z F，et al.Quantitative detection characteristic of stress-induced magnetic anisotropy for ferromagnetic steel [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)，2019，47(5)：22-26.

[14] 徐兰兰.1J50合金磁性能和尺寸稳定性优化工艺及机理研究[D].哈尔滨：哈尔滨工业大学，2014.
XU L L.1J50 alloy magnetic properties and dimensional stability optimization process and mechanism research[D].Harbin：Harbin Institute of Technology，2014.

[15] PAVITHRA G，HWGDE C A.Magnetic property and corrosion resistance of electrodeposited nanocrystalline iron-nickel alloys [J].Applied Surface Science，2012，258(18)：6884-6890.

[16] 李东侠.导磁材料晶粒度与磁性关系的认识[J].机电元件，2015，35(2)：29-31.
LI D X.Recognition of the relationship between grain size and magnetic properties of magnetically conductive materials[J].Electromechanical Components，2015，35(2)：29-31.

[17] 岳建岭，李益民，张健.注射成形Fe-50%Ni软磁合金的微观结构与性能[J].磁性材料及器件，2003，34(4)：15-18.
YUE J L，LI Y M，ZHANG J.Microstructure and properties of lnjection moulded Fe-50%Ni soft magnetic alloy material[J].Journal of Magnetic Materials and Devices，2003，34(4)：15-18.

[18] SRINIVASAN N，PRASAD Y V R K.Processing map for hot working of Ni-16Cr-8Fe alloy (IN 600)[J]. Materials Science and Technology，2013，10(5)：377-383.

[19] 徐惠彬，宫声凯，蒋成保，等.特种功能材料中的固态相变及应用[J].中国材料进展，2011，30(9)：1-12.
XU H B，GONG S K，JIANG C B，et al.Solid-state phase transformations and their applications in special functional materials[J].Materials China，2011，30(9)：1-12.

[20] JIANG Z，WANG P，XING J，et al. Screening and design of novel 2D ferromagnetic materials with high Curie temperature above room temperature[J].ACS Applied Materials & Interfaces，2018，10(45)：39032-39039.

基金项目：国家自然科学基金青年基金项目(52001118)
收稿日期：2023-10-08；**录用日期**：2023-11-21

通讯作者：姚振华(1984—)，男，副教授，博士，主要从事复合材料成型技术、复合材料界面表征及强化技术、金属陶瓷电磁热元件开发及应用、金属陶瓷工模具开发研究及加工、结构残余应力测试分析工作，联系地址：湖北省武汉市武汉理工大学马房山校区材料科学与工程学院(430070)，E-mail：zhyao@whut.edu.cn

(本文责编：张宝玲)