



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101892425 B

(45) 授权公告日 2012.06.13

(21) 申请号 201010257750.9

(22) 申请日 2010.08.20

(73) 专利权人 武汉中磁浩源科技有限公司

地址 430074 湖北省武汉市东湖新技术开发
区关南四路四号

(72) 发明人 陈艳

(74) 专利代理机构 武汉楚天专利事务所 42113

代理人 雷速

(51) Int. Cl.

H01F 1/22 (2006.01)

审查员 佟林松

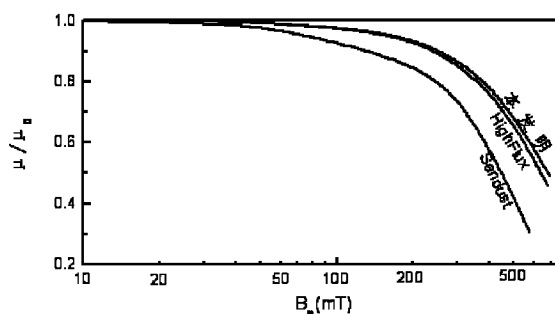
权利要求书 1 页 说明书 7 页 附图 2 页

(54) 发明名称

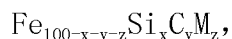
一种软磁合金粉末、磁粉芯及其制备方法

(57) 摘要

本发明实施例提供一种软磁合金粉末,所述软磁合金粉末的成分以质量百分比表示满足下式: $\text{Fe}_{100-x-y-z}\text{Si}_x\text{C}_y\text{M}_z$,其中 $2 < x < 8$, $0.5 < y < 3$, $1 < z < 5$,M选自Cr、V、Al和Mn中的至少一种。本发明实施例提供还一种磁粉芯,采用上述软磁合金粉末制备而成。本发明的软磁合金粉末含有大量的Fe,饱和磁感应强度比较高,含有适量的Si和C,具有良好的软磁性能,同时含有M(M选自Cr、V、Al和Mn中的至少在一种)具有较好的工艺特性,获得了具有高饱和磁化强度和低损耗软磁合金粉末及其磁粉芯,从而显著改善了磁芯直流叠加特性,减少了磁芯发热问题。



1. 一种软磁合金粉末,其特征在于:所述软磁合金粉末的成分以质量百分比表示满足下式:



其中 $2 < x < 8, 0.5 < y < 3, 1 < z < 5$, M 选自 Cr、V、Al 和 Mn 中的至少一种。

2. 根据权利要求 1 所述软磁合金粉末,其特征在于:其成分质量百分比优选为 $\text{Fe}_{100-x-y-z}\text{Si}_x\text{C}_y\text{Cr}_z$,其中 $2 < x < 8, 0.5 < y < 3, 1 < z < 5$,其饱和磁感应强度不小于 1.5T。

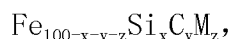
3. 根据权利要求 1 所述软磁合金粉末,其特征在于:其成分质量百分比优选为 $\text{Fe}_{100-x-y-z}\text{Si}_x\text{C}_y\text{Cr}_a\text{Al}_b$,其中 $z = a+b, 2 < x < 8, 0.5 < y < 3, 0.5 < a < 5, 0.5 < b < 5, 1 < a+b < 5$,其饱和磁感应强度不小于 1.5T。

4. 根据权利要求 1 所述软磁合金粉末,其特征在于:该粉末是采用水雾化方法制备的,其氧含量控制在 4000ppm 以下。

5. 根据权利要求 2 或 3 所述软磁合金粉末,其特征在于:该粉末是采用水雾化方法制备的,其氧含量控制在 3500ppm 以下。

6. 根据权利要求 1 所述软磁合金粉末,其特征在于:所述软磁合金粉末在 100kHz、50mT 下的损耗小于 $300\text{kW}/\text{m}^3$,在直流叠加磁场下磁化到 0.5T,磁导率下降幅度不大于 25%。

7. 一种磁粉芯,其特征在于:其采用软磁合金粉末制备而成,所述软磁合金粉末的成分以质量百分比表示满足下式:

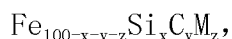


其中 $2 < x < 8, 0.5 < y < 3, 1 < z < 5$, M 选自 Cr、V、Al 和 Mn 中的至少一种。

8. 一种磁粉芯,其特征在于:采用如权利要求 2 所述软磁合金粉末制备而成,在 100kHz、50mT 下的损耗小于 $230\text{kW}/\text{m}^3$,其在直流叠加磁场下磁化到 0.5T,磁导率下降幅度不大于 25%。

9. 一种磁粉芯,其特征在于:采用如权利要求 3 所述软磁合金粉末制备而成,在 100kHz、50mT 下的损耗小于 $200\text{kW}/\text{m}^3$,其在直流叠加磁场下磁化到 0.5T,磁导率下降幅度不大于 25%。

10. 一种磁粉芯的制备方法,其特征在于:包括将软磁合金粉末依次采用钝化、绝缘、粘结、润滑、压制和热处理的工序合成磁粉芯,所述软磁合金粉末的成分以质量百分比表示满足下式:



其中 $2 < x < 8, 0.5 < y < 3, 1 < z < 5$, M 选自 Cr、V、Al 和 Mn 中的至少一种。

一种软磁合金粉末、磁粉芯及其制备方法

技术领域

[0001] 本发明涉及磁性功能材料,具体是一种软磁合金粉末、磁粉芯及其制备方法。

背景技术

[0002] 现有的金属软磁合金磁粉芯主要有 Sendust、MPP 和 HighFlux 三大类。其中 MPP 磁粉芯具有超强的稳定性,适用于比较苛刻的使用条件下,目前大部分应用在军用电子器件中,民用电子器件中应用较少,总体用量也比较少;Sendust 和 HighFlux 磁粉芯是两类在民用电子器件中大量应用的磁芯材料。

[0003] Sendust 的主要成分是 Fe、Si 和 Al,其特点是成本比较低、损耗比较低,缺点是在直流叠加条件下,磁导率下降比较快;HighFlux 的主要成分 Fe 和 Ni,特点是直流叠加特性很好,缺点是成本比较高,损耗也比较高。以上两种磁芯在实际应用中存在需要进一步优化的问题,其中 Sendust 磁芯的问题是体积比较大,对器件的小型化不利;HighFlux 存在磁芯发热问题和成本问题。

[0004] 由于现有产品 Sendust 磁芯在实际应用存在直流叠加特性不好带来的体积大的问题;HighFlux 磁芯存在发热问题以及由于 Ni 含量高所带来的成本问题,实际应用条件受到局限。

发明内容

[0005] 本发明提供一种软磁合金粉末、磁粉芯及其制备方法,该软磁合金粉末具有高饱和和磁感应强度的特点,采用该粉末制备的磁粉芯具有损耗低、直流叠加特性好的优点。由于具有以上优点,这种磁芯在实际应用时具有发热少、体积小和成本低的优势。

[0006] 本发明实施例提供一种软磁合金粉末,所述软磁合金粉末的成分以质量百分比表示满足下式:

[0007] $\text{Fe}_{100-x-y-z}\text{Si}_x\text{C}_y\text{M}_z$,

[0008] 其中 $2 < x < 8, 0.5 < y < 3, 1 < z < 5$, M 选自 Cr、V、Al 和 Mn 中的至少一种。

[0009] 本发明实施例还提供一种磁粉芯,其采用软磁合金粉末制备而成,所述软磁合金粉末的成分以质量百分比表示满足下式:

[0010] $\text{Fe}_{100-x-y-z}\text{Si}_x\text{C}_y\text{M}_z$,

[0011] 其中 $2 < x < 8, 0.5 < y < 3, 1 < z < 5$, M 选自 Cr、V、Al 和 Mn 中的至少一种。

[0012] 本发明实施例还提供一种磁粉芯的制备方法,包括将软磁合金粉末依次采用钝化、绝缘、粘结、润滑、压制和热处理的工序合成磁粉芯,所述软磁合金粉末的成分以质量百分比表示满足下式:

[0013] $\text{Fe}_{100-x-y-z}\text{Si}_x\text{C}_y\text{M}_z$,

[0014] 其中 $2 < x < 8, 0.5 < y < 3, 1 < z < 5$, M 选自 Cr、V、Al 和 Mn 中的至少一种。

[0015] 本发明的软磁合金粉末含有大量的 Fe,饱和磁感应强度比较高,含有适量的 Si 和 C,具有良好的软磁性能,同时含有 M(M 选自 Cr、V、Al 和 Mn 中的至少在一种)具有较好的工

艺特性,获得了具有高饱和磁化强度和低损耗软磁合金粉末及其磁粉芯,从而显著改善了磁芯直流叠加特性,减少了磁芯发热问题。

附图说明

[0016] 图1为本发明实施例中 $\text{Fe}_{93.8}\text{Si}_{3.6}\text{C}_{0.6}\text{Mn}_2$ 的合金水雾化粉末的形貌照片;

[0017] 图2为本发明实施例中 $\text{Fe}_{93.8}\text{Si}_{3.6}\text{C}_{0.6}\text{Mn}_2$ 磁芯退火温度随时间的变化曲线;

[0018] 图3为本发明实施例中 $\text{Fe}_{93.8}\text{Si}_{3.6}\text{C}_{0.6}\text{Mn}_2$ 的合金磁芯在直流叠加磁场下比磁导率随磁化强度的变化曲线。

具体实施方式

[0019] 下面将结合本发明中的附图,对本发明中的技术方案进行清楚、完整地描述。

[0020] 本发明的软磁合金粉末,所述软磁合金粉末的成分以质量百分比表示满足下式:

[0021] $\text{Fe}_{100-x-y-z}\text{Si}_x\text{C}_y\text{M}_z$,

[0022] 其中 $2 < x < 8, 0.5 < y < 3, 1 < z < 5$, M选自Cr、V、Al和Mn中的至少一种。

[0023] 本发明的软磁合金粉末含有大量的Fe,饱和磁感应强度比较高,含有适量的Si和C,具有良好的软磁性能,同时含有M(M选自Cr、V、Al和Mn中的至少一种)具有较好的工艺特性。具体分析如下:

[0024] 对于 $\text{Fe}_{100-x-y-z}\text{Si}_x\text{C}_y\text{M}_z$ (M选自Cr、V、Al和Mn中的至少一种)合金, Si含量在2~8wt. %之间, C含量在0.5~3wt. %之间,同时含有少量M元素,其饱和磁感应强度比较高,一般不小于1.5T,并且软磁性能优良。如果Si、C含量过高,合金饱和磁感应强度将会降低,从而导致其磁粉芯的直流叠加特性快速恶化,同时磁芯损耗得不到有效地提升。少量M元素(M选自Cr、V、Al和Mn)的加入可以使该合金在冶炼及热处理等工艺环节时氧化量得到比较好的控制。

[0025] 本发明的软磁合金粉末可以采用水雾化方法制备,也可以通过其他常用方法如气雾化方法、破碎方法等制备粉末。采用水雾化工艺制备粉末,其氧含量可控制在4000ppm以下。对于该合金。采用水雾化工艺制备粉末,其氧含量可控制在4000ppm以下。采用以上成分的粉末,依次采用钝化、绝缘、粘结、润滑、压制和热处理的工序合成磁粉芯,其磁导率可以达到73,在100kHz、50mT测试条件下的损耗不大于 $300\text{kW}/\text{m}^3$ 。对于以上磁粉芯,在直流叠加条件下工作点为0.5T时,其磁导率下跌不超过25%。

[0026] 实施例1

[0027] 在本发明的一个实施例中, M选择为Mn,其中x、y和z可分别取值如下: $x = 3.6, y = 0.6, z = 2$,即软磁合金粉末的表达式为 $\text{Fe}_{93.8}\text{Si}_{3.6}\text{C}_{0.6}\text{Mn}_2$ 。

[0028] 采用质量百分比为 $\text{Fe}_{93.8}\text{Si}_{3.6}\text{C}_{0.6}\text{Mn}_2$ 的合金进行水雾化试验,制备的粉末形貌如图1所示。其中粉末相关性能参数列于下表:

[0029]

性能参数	$\text{Fe}_{93.8}\text{Si}_{3.6}\text{C}_{0.6}\text{Mn}_2$
粉末氧含量	3200ppm

粉末松装密度	3.2g/cm ³
粉末振实密度	4.6g/cm ³

[0030] 将该粉末用强氧化剂进行钝化处理,再经过绝缘、粘结和润滑后压制成磁芯,磁芯在 520℃、氢气气氛下等温退火 10 分钟,其退火过程中退火温度随时间的变化曲线如图 2 所示。

[0031] 退火后磁芯的性能在下表中列出:

[0032]

性能参数	本发明合金	对比例 1	对比例 2
	Fe _{93.8} Si _{3.6} C _{0.6} Mn ₂	Sendust	HighFlux
磁导率	60	60	60
直流叠加磁化到 0.5T, 磁导率下降量	22%	48%	24%
饱和磁感应强度	1.63T	1.05T	1.50T
100kHz、50mT 损耗	250kW/m ³	220 kW/m ³	280 kW/m ³

[0033] 作为对比也列出了现有产品 Sendust 和 HighFlux 磁芯的性能数据,其中磁芯在直流叠加磁场下磁导率随磁化强度的变化曲线如图 3 所示。由上表及图 3 可以看出,选用相同的工作点,本发明 Fe_{93.8}Si_{3.6}C_{0.6}Mn₂ 磁芯在直流叠加条件下磁导率下跌量显著小于 Sendust 磁芯,与 HighFlux 磁芯相当;损耗高于 Sendust 磁芯,低于 HighFlux 磁芯。从粉末的主要成分可以看出,该粉末以 Fe 为主,成本与 Sendust 粉末接近,显著低于 Ni 基 HighFlux 粉末。

[0034] 实施例 2

[0035] 采用本发明成分范围内的 Fe₉₅Si_{2.5}C₁Mn_{1.5}、Fe_{92.5}Si₅C₁Mn₁V_{0.5}、Fe_{91.4}Si₇C_{0.6}Mn_{1.5} 的合金以及超出本发明合金成分范围的 Fe₈₆Si₁₂C₁Mn₁ 合金 (Si 含量过高超出本发明的范围 2 < x < 8) 进行水雾化试验制备粉末,粉末相关性能参数列于下表。

[0036]

性能参数	本发明合金			对比例 3
	$\text{Fe}_{95}\text{Si}_{2.5}\text{C}_1\text{Mn}_{1.5}$ 粉末性能	$\text{Fe}_{92.5}\text{Si}_5\text{C}_1\text{Mn}_1\text{V}_{0.5}$ 粉末性能	$\text{Fe}_{91.4}\text{Si}_7\text{C}_{0.6}\text{Mn}_{1.5}$ 粉末性能	$\text{Fe}_{86}\text{Si}_{12}\text{C}_1\text{Mn}_1$ 粉末性能
粉末氧含量	3800ppm	3300ppm	3300ppm	3100ppm
粉末松装密度	2.9g/cm^3	3.1g/cm^3	3.2g/cm^3	3.3g/cm^3
粉末振实密度	4.4g/cm^3	4.5g/cm^3	4.6g/cm^3	4.6g/cm^3

[0037] 将以上粉末用强氧化剂进行钝化处理,在经过绝缘、粘结和润滑后压制成磁芯,磁芯在 520°C 、氢气气氛下等温退火 10 分钟,其退火过程与实施例 1 相同。退火后磁芯的性能在下表中列出:

[0038]

性能参数	本发明合金			对比例 3
	$\text{Fe}_{95}\text{Si}_{2.5}\text{C}_1\text{Mn}_{1.5}$	$\text{Fe}_{92.5}\text{Si}_5\text{C}_1\text{Mn}_1\text{V}_{0.5}$	$\text{Fe}_{90.9}\text{Si}_7\text{C}_{0.6}\text{Mn}_{1.5}$	$\text{Fe}_{86}\text{Si}_{12}\text{C}_1\text{Mn}_1$
磁导率	55	70	73	75
直流叠加磁化到 0.5T, 磁导率下降量	18%	22%	24%	45%
饱和磁感应强度	1.72T	1.61T	1.53T	1.32T
100kHz、0.05T 损耗	290 kW/m^3	280 kW/m^3	260 kW/m^3	250 kW/m^3

[0039] 由上表可以看出,当 Si 含量在本发明范围内,磁芯在直流叠加条件下磁导率比较稳定,其在 0.5T 下磁导率下跌不大于 25%。而当 Si 含量过高超出本发明的范围(对比例 3),磁芯在直流叠加条件下磁导率下降的显著加快,其在 0.5T 下磁导率下跌达到了 45%,与此同时损耗并没有显著降低,因此 Si 含量不宜过高。

[0040] 实施例 3

[0041] 在 FeSiCM (M 选自 Cr、V、Al 和 Mn) 合金体系中,选取 M 为 Cr,采用本发明成分范围内的 $\text{Fe}_{92}\text{Si}_3\text{C}_1\text{Cr}_4$ 、 $\text{Fe}_{92.5}\text{Si}_4\text{C}_{1.5}\text{Cr}_2$ 、 $\text{Fe}_{90}\text{Si}_{6.5}\text{C}_{2.5}\text{Cr}_1$ 合金以及超出本发明成分范围的 $\text{Fe}_{85}\text{Si}_{6.5}\text{C}_{2.5}\text{Cr}_6$ 合金(Cr 含量过高超出本发明的范围 $1 < z < 5$ 进行水雾化试验制备粉末,粉末相关性能参数列于下表:

[0042]

性能参数	本发明合金			对比例 4
	$\text{Fe}_{92}\text{Si}_3\text{C}_1\text{Cr}_4$	$\text{Fe}_{92.5}\text{Si}_4\text{C}_{1.5}\text{Cr}_2$	$\text{Fe}_{90}\text{Si}_{6.5}\text{C}_{2.5}\text{Cr}_1$	$\text{Fe}_{85}\text{Si}_{6.5}\text{C}_{2.5}\text{Cr}_6$
粉末氧含量	2500ppm	2700ppm	3300ppm	2400ppm
粉末松装密度	$3.4\text{g}/\text{cm}^3$	$3.3\text{g}/\text{cm}^3$	$3.2\text{g}/\text{cm}^3$	$3.3\text{g}/\text{cm}^3$
粉末振实密度	$4.7\text{g}/\text{cm}^3$	$4.7\text{g}/\text{cm}^3$	$4.6\text{g}/\text{cm}^3$	$4.6\text{g}/\text{cm}^3$

[0043] 将以上粉末用强氧化剂进行钝化处理,在经过绝缘、粘结和润滑后压制成磁芯,磁芯在 520°C 、氢气气氛下等温退火 10 分钟,其退火过程与实施例 1 相同,退火后磁芯的性能在下表中列出:

[0044]

性能参数	本发明合金			对比例 4
	$\text{Fe}_{92}\text{Si}_3\text{C}_1\text{Cr}_4$	$\text{Fe}_{92.5}\text{Si}_4\text{C}_{1.5}\text{Cr}_2$	$\text{Fe}_{90}\text{Si}_{6.5}\text{C}_{2.5}\text{Cr}_1$	$\text{Fe}_{85}\text{Si}_{6.5}\text{C}_{2.5}\text{Cr}_6$
磁导率	74	79	75	76
直流叠加磁化到 0.5T, 磁导率下降量	21%	21%	24%	49%
饱和磁感应强度	1.61T	1.61T	1.52T	1.30T
100kHz、0.05T 损耗	$200\text{ kW}/\text{m}^3$	$180\text{ kW}/\text{m}^3$	$220\text{ kW}/\text{m}^3$	$250\text{ kW}/\text{m}^3$

[0045] 由上表可以看出,在 FeSiCM (M 选自 Cr、V、Al 和 Mn) 合金体系中,当 M 为 Cr 时,制备的磁芯总体损耗较低,不超过 $230\text{ kW}/\text{m}^3$ 。当 Cr 含量在本发明范围内,磁芯在直流叠加条件下磁导率比较稳定,其在 0.5T 下磁导率下跌不大于 25%。而当 Cr 含量过高超出本发明的范围(对比例 4),磁芯在直流叠加条件下磁导率下降的显著加快,其在 0.5T 下磁导率下跌达到了 49%,与此同时损耗也出现了升高。因此 Cr 含量应控制在适当的范围内,不宜过高。

[0046] 本实施例加入适当的 Cr,合金抗氧化特性会得到提高,粉末氧含量有所降低,磁粉芯损耗也有所降低。对于该优选成分,采用水雾化工艺制备粉末,其氧含量可控制在 3500ppm 以下。采用以上成分的粉末,依次采用钝化、绝缘、粘结、润滑、压制和热处理的工序合成磁粉芯,其磁导率可以达到 79,在 100kHz、50mT 测试条件下的损耗不大于 $230\text{ kW}/\text{m}^3$ 。对于以上磁粉芯,在直流叠加条件下工作点为 0.5T 时,其磁导率下跌不超过 25%。

[0047] 实施例 4

[0048] 在本发明的另一个实施例中,M 选择为 Cr 和 Al,其表达式为

[0049] $\text{Fe}_{100-x-y-z}\text{Si}_x\text{C}_y\text{Cr}_a\text{Al}_b$,

[0050] 其中 $z = a+b$, $2 < x < 8$, $0.5 < y < 3$, $0.5 < a < 5$, $0.5 < b < 5$, $1 < a+b < 5$ 。

[0051] 采用本发明成分范围内的 $\text{Fe}_{92.5}\text{Si}_{2.5}\text{C}_1\text{Cr}_2\text{Al}_2$ 、 $\text{Fe}_{90.5}\text{Si}_4\text{C}_{1.5}\text{Cr}_1\text{Al}_3$ 和 $\text{Fe}_{90}\text{Si}_4\text{C}_2\text{Cr}_3\text{Al}_1$ 合金进行水雾化试验制备粉末, 粉末相关性能参数列于下表:

[0052]

性能参数	本发明合金		
	$\text{Fe}_{92.5}\text{Si}_{2.5}\text{C}_1\text{Cr}_2\text{Al}_2$	$\text{Fe}_{90.5}\text{Si}_4\text{C}_{1.5}\text{Cr}_1\text{Al}_3$	$\text{Fe}_{90}\text{Si}_4\text{C}_2\text{Cr}_3\text{Al}_1$
粉末氧含量	2700ppm	3200ppm	2500ppm
粉末松装密度	3.4g/cm ³	3.3g/cm ³	3.2g/cm ³
粉末振实密度	4.7g/cm ³	4.6g/cm ³	4.6g/cm ³

[0053] 将以上粉末用强氧化剂进行钝化处理, 在经过绝缘、粘结和润滑后压制成磁芯, 磁芯在 520℃、空气气氛下等温退火 10 分钟, 其退火过程中温度随时间的变化曲线与实施例 1 相同, 退火后磁芯的性在下表中列出:

[0054]

性能参数	本发明合金		
	$\text{Fe}_{92.5}\text{Si}_{2.5}\text{C}_1\text{Cr}_2\text{Al}_2$	$\text{Fe}_{90.5}\text{Si}_4\text{C}_{1.5}\text{Cr}_1\text{Al}_3$	$\text{Fe}_{90}\text{Si}_4\text{C}_2\text{Cr}_3\text{Al}_1$
磁导率	78	82	85
直流叠加磁化到 0.5T, 磁导率下降量	22%	23%	24%
饱和磁感应强度	1.61T	1.53T	1.51T
100kHz、0.05T 损耗	190 kW/m ³	160 kW/m ³	180 kW/m ³

[0055] 由上表可以看出, 在 FeSiCM (M 选自 Cr、V、Al 和 Mn) 合金体系中, 将 M 选取为 Cr 和 Al 的组合, 粉末的抗氧化特性得到了提升, 磁芯可以通过空气退火方法获得比较好的性能, 磁粉芯磁导率和损耗都得到了不同程度的提升, 其中损耗可以下降到 200kW/m³ 以下。

[0056] 本实施例在加入适当 Cr 的同时再加入适当的 Al, 合金磁芯在热处理过程中抗氧化特性会得到进一步地提高, 可以采用空气处理方法进行磁芯热处理, 磁粉芯损耗会有所降低, 磁导率也会有所提升。对于该优选成分, 采用水雾化工艺制备粉末, 其氧含量可控制在 3500ppm 以下。采用以上成分的粉末, 依次采用钝化、绝缘、粘结、润滑、压制和热处理的工序合成磁粉芯, 其磁导率可以达到 85, 在 100kHz、50mT 测试条件下的损耗不大于 200kW/m³。对于以上磁粉芯, 在直流叠加条件下工作点为 0.5T 时, 其磁导率下跌不超过 25%。

[0057] 本发明实施例还提供一种磁粉芯, 包括软磁合金粉末, 所述软磁合金粉末的成分以质量百分比表示满足下式:

[0058] $\text{Fe}_{100-x-y-z}\text{Si}_x\text{C}_y\text{M}_z$,

[0059] 其中 $2 < x < 8$, $0.5 < y < 3$, $1 < z < 5$, M 选自 Cr、V、Al 和 Mn 中的至少一种。

[0060] 本发明实施例还提供一种磁粉芯的制备方法,包括将软磁合金粉末依次采用钝化、绝缘、粘结、润滑、压制和热处理的工序合成磁粉芯,所述软磁合金粉末的成分以质量百分比表示满足下式:

[0061] $\text{Fe}_{100-x-y-z}\text{Si}_x\text{C}_y\text{M}_z$,

[0062] 其中 $2 < x < 8$, $0.5 < y < 3$, $1 < z < 5$, M 选自 Cr、V、Al 和 Mn 中的至少一种。

[0063] 以上所述,仅为本发明的具体实施方式,但本发明的保护范围并不局限于此,任何属于本技术领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内,可轻易想到的变化或替换,都应涵盖在本发明的保护范围之内。因此,本发明的保护范围应该以权利要求的保护范围为准。

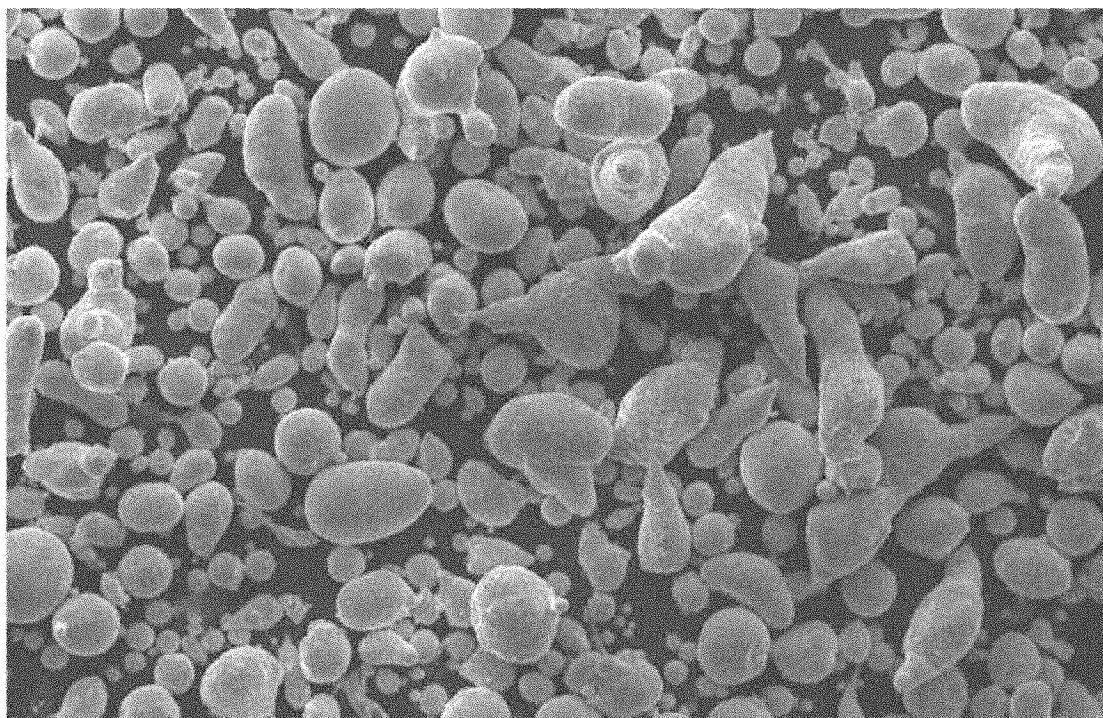


图 1

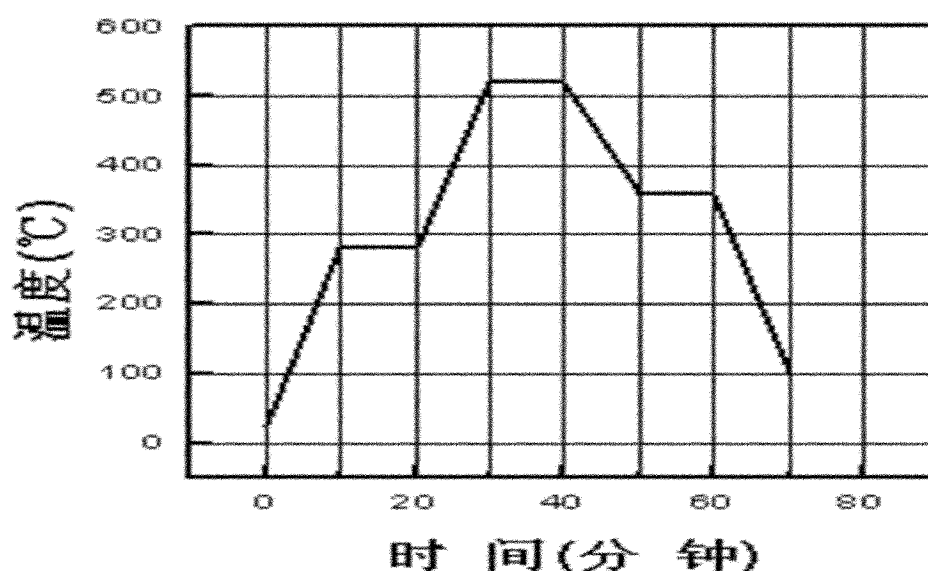


图 2

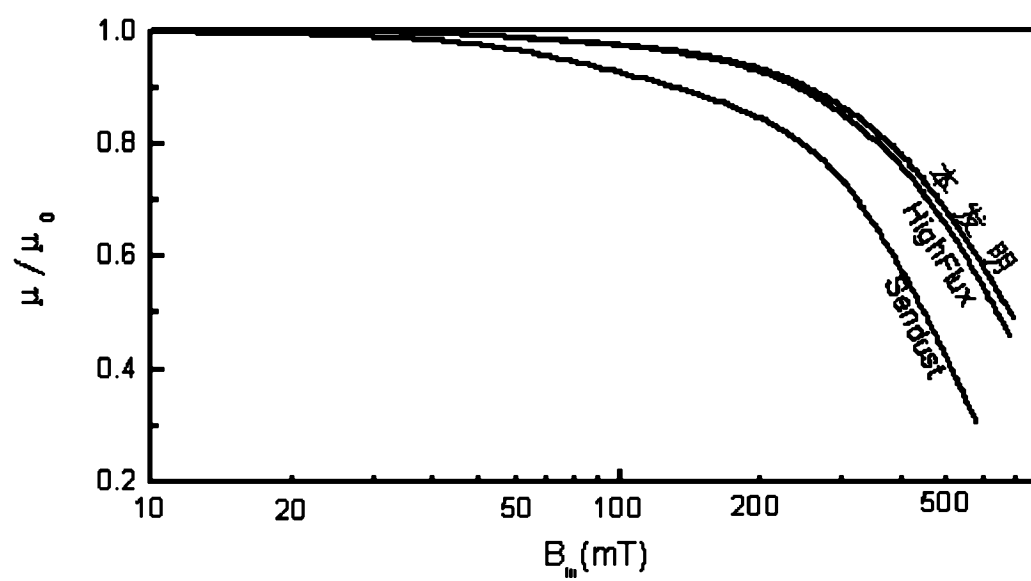


图 3