(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 110225801 B
(45)授权公告日 2022.01.18

(21)申请号 201880008431.9

(22)申请日 2018.01.26

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 110225801 A

(43)申请公布日 2019.09.10

(30)优先权数据
2017-012977 2017.01.27 JP

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2019.07.25

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/JP2018/002380 2018.01.26

(87)PCT国际申请的公布数据
WO2018/139563 JA 2018.08.02

(73)专利权人 株式会社东金
地址 日本宫城县
专利权人 杰富意钢铁株式会社

(72)发明人 浦田显理 千叶美帆 村木峰男
中世古诚 高下拓也

(74)专利代理机构 北京柏杉松知识产权代理事务所(普通合伙) 11413
代理人 袁波 刘继富

(51)Int.Cl.
B22F 1/00(2006.01)

审查员 高港

权利要求书1页 说明书20页

(54)发明名称

软磁性粉末、Fe基纳米晶合金粉末、磁性部件及压粉磁芯

(57)摘要

本发明提供一种软磁性粉末，该软磁性粉末除了不可避免的杂质之外由组成式$Fe_aSi_bB_cP_dCu_e$表示。在上述的组成式中，$79\leq a\leq 84.5$at%、$0\leq b<6$at%、$4\leq c\leq 10$at%、$4<d\leq 11$at%、$0.2\leq e<0.4$at%、且$a+b+c+d+e=100$at%。

CN 110225801 B

1.一种软磁性粉末,其除了不可避免的杂质之外由组成式$Fe_aSi_bB_cP_dCu_e$表示,并且,

79≤a≤84.5at%、0≤b<6at%、4≤c≤10at%、4<d≤11at%、0.2≤e<0.4at%、且a+b+c+d+e=100at%,

所述软磁性粉末将非晶相作为主相,包含按体积比为10%以下的结晶相。

2.根据权利要求1所述的软磁性粉末,其中,

b≥2at%。

3.根据权利要求1所述的软磁性粉末,其中,

e≥0.3at%。

4.根据权利要求3所述的软磁性粉末,其中,

e≥0.35at%。

5.根据权利要求1所述的软磁性粉末,其中,

d>5at%。

6.根据权利要求1所述的软磁性粉末,其中,

用选自Cr、V、Mn、Co、Ni、Zn、Nb、Zr、Hf、Mo、Ta、W、Ag、Au、Pd、K、Ca、Mg、Sn、C、Y及稀土元素之中的一种以上的元素对Fe的3at%以下进行了置换。

7.根据权利要求1所述的软磁性粉末,其中,

包含作为所述不可避免的杂质的选自Al、Ti、S、O、N中的一种以上的元素,Al的含量为0.1质量%以下,Ti的含量为0.1质量%以下,S的含量为0.1质量%以下,O的含量为1.0质量%以下,N的含量为0.01质量%以下。

8.根据权利要求7所述的软磁性粉末,其中,

Al的含量为0.01质量%以下,Ti的含量为0.01质量%以下,S的含量为0.05质量%以下,O的含量为0.3质量%以下,N的含量为0.002质量%以下。

9.根据权利要求1所述的软磁性粉末,其中

包含按体积比为3%以下的结晶相。

10.一种Fe基纳米晶合金粉末,其以权利要求1至权利要求9中的任一项所述的软磁性粉末作为起始原料而被制造。

11.一种磁性部件,其具有权利要求10所述的Fe基纳米晶合金粉末。

12.一种压粉磁芯,其具有权利要求10所述的Fe基纳米晶合金粉末。

软磁性粉末、Fe基纳米晶合金粉末、磁性部件及压粉磁芯

技术领域

[0001] 本发明涉及适合于变压器、电感器、电动机的磁芯等磁性部件所使用的软磁性粉末。

背景技术

[0002] 这种软磁性粉末例如在专利文献1中被公开。

[0003] 在专利文献1中公开了由Fe、B、Si、P、C及Cu构成的合金组合物。专利文献1的合金组合物具有连续薄带形状或粉末形状。粉末形状的合金组合物(软磁性粉末)例如通过雾化法制造,将无定形相(非晶相)作为主相。通过对该软磁性粉末实施基于规定的热处理条件的热处理,从而析出bccFe的纳米结晶,由此得到Fe基纳米晶合金粉末。通过使用这样得到的Fe基纳米晶合金粉末,从而得到具有优异的磁特性的磁性部件。

[0004] 现有技术文献

[0005] 专利文献

[0006] 专利文献1:日本专利第4514828号公报。

发明内容

[0007] 发明要解决的课题

[0008] 在由软磁性粉末得到Fe基纳米晶合金粉末的情况下,从得到具有充分的磁特性的Fe基纳米晶合金粉末这样的观点出发,软磁性粉末优选实质上仅由无定形相(非晶相)组成(即,结晶度极低)。然而,当想得到结晶度极低的软磁性粉末时,需要昂贵的原料,并且需要通过雾化后的分级而排除大粒径的粉末等的复杂的工序。即,增加制造成本。

[0009] 因此,本发明的目的在于提供一种避免制造成本的增加并且能够制造具有充分的磁特性的Fe基纳米晶合金粉末的软磁性粉末。

[0010] 用于解决课题的方案

[0011] 通过本发明的发明人潜心研究,得到了不适于连续薄带但适于软磁性粉末的规定的组份范围。该组份范围由于结晶的混合的原因不能得到必要的均匀性,因此不适于连续薄带的形成。另一方面,在使用了该组份范围的软磁性粉末的情况下,通过将热处理前的结晶度抑制在10%以下,从而得到具有充分的磁特性的Fe基纳米晶合金粉末。具体而言,即使是包含某种程度的微结晶(结晶相)的软磁性粉末,如果结晶度为10%以下,则与由结晶度非常接近零的软磁性粉末得到的Fe基纳米晶合金粉末相比,热处理后的Fe基纳米晶合金粉末具有不逊色于上述Fe基纳米晶合金粉末的磁特性。本发明提供一种具有该组份范围的下述软磁性粉末。

[0012] 本发明的一个方面在于提供一种软磁性粉末,为除了不可避免的杂质之外由组成式$Fe_aSi_bB_cP_dCu_e$表示的软磁性粉末,其中,$79 \leq a \leq 84.5$at%、$0 \leq b < 6$at%、$4 \leq c \leq 10$at%、$4 < d \leq 11$at%、$0.2 \leq e < 0.4$at%、且$a+b+c+d+e = 100$at%。

[0013] 发明效果

[0014] 本发明的软磁性粉末，由于包含规定范围的Fe、Si、B、P及Cu，能够将结晶度控制在10％以下。通过将结晶度控制在10％以下，从而通过与现有技术相同的热处理而得到具有充分的磁特性的Fe基纳米晶合金粉末。即，通过不使结晶度非常接近零，而是容许10％以下的一定程度的结晶度，从而得到避免制造成本的增加并且能够制造具有充分的磁特性的Fe基纳米晶合金粉末的软磁性粉末。

[0015] 通过对下述的最佳的实施方式的说明进行探讨，由此能够准确地理解本发明的目的，且更完整地理解其结构。

具体实施方式

[0016] 对于本发明，能够以多种变形、各种方式实现，但作为其一例，下面对于特定的实施方式进行详细说明。实施方式不限定于在此公开本发明的特定的方式，在随附的权利要求书中明示的范围内实现的所有的变形例、均等物、代替例包含在该对象中。

[0017] 本实施方式的软磁性粉末除了不可避免的杂质之外由组成式 $Fe_aSi_bB_cP_dCu_e$ 表示。在组成式 $Fe_aSi_bB_cP_dCu_e$ 中，$79 \leqslant a \leqslant 84.5$at％、$0 \leqslant b < 6$at％、$4 \leqslant c \leqslant 10$at％、$4 < d \leqslant 11$at％、$0.2 \leqslant e < 0.4$at％、且 $a+b+c+d+e = 100$at％。

[0018] 本实施方式的软磁性粉末能够作为Fe基纳米晶合金粉末的起始原料使用。由本实施方式的软磁性粉末制造的Fe基纳米晶合金粉末能够作为用于制造各种的磁性部件、压粉磁芯的材料使用。另外，本实施方式的软磁性粉末也能够作为用于制造各种的磁性部件、压粉磁芯的直接的材料使用。

[0019] 以下，首先，主要对本实施方式的软磁性粉末和Fe基纳米晶合金粉末的特性进行说明。

[0020] 本实施方式的软磁性粉末能够通过雾化法等的制造方法进行制造。这样制造的软磁性粉末将无定形相(非晶相)作为主相。通过对该软磁性粉末实施基于规定的热处理条件的处理，从而析出bccFe(αFe)纳米结晶，由此得到具有优异的磁性特性的Fe基纳米晶合金粉末。即，本实施方式的 Fe基纳米晶合金粉末为将非晶相作为主相且包含bccFe的纳米结晶的Fe 基合金。

[0021] 在通常情况下，在制造将非晶相作为主相的软磁性粉末时。有时析出αFe的微结晶(前期析出物)。前期析出物成为Fe基纳米晶合金粉末的磁特性劣化的一个原因。具体而言，由于前期析出物的原因，有时在Fe基纳米晶合金粉末中析出具有超过50nm的粒径的纳米结晶。超过50nm的粒径的纳米结晶仅少量析出就会阻碍磁畴壁的移动，使Fe基纳米晶合金粉末的磁特性劣化。因此，在通常情况下，认为优选将前期析出物与软磁性粉末的体积比即初始结晶度(以下，简称为“结晶度”)尽可能降低，制造实际上仅由非晶相组成的软磁性粉末。然而，当想得到结晶度极低的软磁性粉末时，需要昂贵的原料，并且需要通过雾化后的分级排除大粒径的粉末等的复杂的工序。即，增加制造成本。

[0022] 如上所述，本实施方式的组成式 $Fe_aSi_bB_cP_dCu_e$ 的软磁性粉末如上述那样地包含79at％以上且84.5at以下的Fe、小于6at％(包含0)的Si，4at％以上且10at％以下的B，大于4at％且11at％以下的P，以及0.2at％以上且小于0.4at％的Cu。该组份范围(以下，称为“规定范围”)由于结晶(前期析出物)的混合的原因不能得到必要的均匀性，因此不适于连续薄带的形成。具体而言，在制造本实施方式的组份范围的连续薄带的情况下，有可能包含按体

积比10％以下的前期析出物。即，结晶度有可能成为10％左右。在该情况下，由于前期析出物的原因，连续薄带有可能部分地脆弱化。进而，纳米结晶化后也不能得到均匀的细微组织，磁特性有可能显著劣化。

[0023] 另一方面，上述的问题为连续薄带中固有的问题。对于软磁性粉末，即使结晶度成为10％左右，也几乎没有产生结构上的问题。进而，如果能够将结晶度控制到10％以下，则磁畴壁的锁住点减小。具体而言，在将结晶度控制在10％以下的情况下。即使通过进行与现有技术相同的热处理，也能够抑制Fe基纳米晶合金粉末中超过50nm的粒径的纳米结晶的析出，得到与从结晶度非常接近零的软磁性粉末得到的Fe基纳米晶合金粉末相比不逊色的具有充分磁特性的Fe基纳米晶合金粉末。

[0024] 本实施方式的软磁性粉末由于包含规定范围的Fe、Si、B、P、Cu，因此，能够将结晶度控制在10％以下。通过将结晶度控制在10％以下，从而通过进行与现有技术相同的热处理得到具有充分的磁特性的Fe基纳米晶合金粉末。即，通过容许使结晶度稍微小于10％，而不是使结晶度非常接近零，从而得到避免制造成本的增加并且能够制造具有充分的磁特性的Fe 基纳米晶合金粉末的软磁性粉末。更具体而言，根据本实施方式，能够使用通常的雾化装置，由比较便宜的原料制造出稳定的软磁性粉末。此外，能够缓和原料的溶解温度等制造条件。

[0025] 如上述那样，根据本实施方式得到将非晶相作为主相且包含按体积比为10％以下的αFe的微结晶(基于前期析出物的结晶相)的软磁性粉末。结晶度越小越优选。例如，软磁性粉末也可以包含按体积比为3％以下的结晶相。为了将结晶度设为3％以下，优选a≤83.5at％，c≤8.5at％，且d ≥5.5at％。

[0026] 在结晶度为3％以下的情况下，提高制造压粉磁芯时的成型密度。具体而言，当结晶度超过3％时，成型密度有可能降低，但在结晶度为3％以下的情况下，能够抑制成型密度的降低，由此能够维持透磁率。另外，在结晶度为3％以下的情况下，容易维持软磁性粉末的外观。具体而言，当结晶度超过3％时，雾化后的软磁性粉末由于氧化有可能变色，但在结晶度为 3％以下的情况下，能够抑制软磁性粉末的变色且维持外观。

[0027] 将本实施方式的软磁性粉末在Ar气体环境这样的惰性环境中进行热处理时，能够确认结晶化为2次以上。将首先开始结晶化的温度称作第一结晶化开始温度(T_{x1})，将第二次开始结晶化的温度称作第二结晶化开始温度(T_{x2})。此外，将第一结晶化开始温度(T_{x1})和第二结晶化开始温度 (T_{x2})之间的温度差称作ΔT＝T_{x2}-T_{x1}。第一结晶化开始温度(T_{x1})为bccFe 的纳米结晶析出的放热峰值，第二结晶化开始温度(T_{x2})为FeB、FeP等化合物析出的放热峰值。这些结晶化温度例如能够通过使用差示扫描量热分析(DSC)装置以40℃/分钟左右的升温速度进行热分析来评价。

[0028] 在ΔT大的情况下，容易进行在规定的热处理条件下的热处理。因此，能够通过热处理仅使bccFe的纳米晶体析出而得到良好的磁特性的Fe基纳米晶合金粉末。即，通过将ΔT变大，从而Fe基纳米晶合金粉末中的bccFe 的纳米晶体组织变得稳定，且具有Fe基纳米晶合金粉末的压粉磁芯的磁芯损耗也降低。

[0029] 以下，对本实施方式的软磁性粉末的组份范围进行更详细地说明。

[0030] 在本实施方式的软磁性粉末中，Fe元素为主元素，是承担磁性的必要元素。为了实现Fe基纳米晶合金粉的饱和磁通密度Bs的提高及原料价格的降低，原则上优选Fe的比例

多。但是，如所述那样，本实施方式的Fe 的比例优选为79at％以上且为84.5at％以下。具体而言，为了在Fe基纳米晶合金粉末中得到所需的饱和磁通密度Bs，Fe的比例需要设为79at％以上，为了制造具有10％以下的结晶度的软磁性粉末，Fe的比例需要设为84.5at％以下。在Fe的比例为79at％以上的情况下，除上述的效果之外，能够增大ΔT。为了使饱和磁通密度Bs提高，Fe的比例进一步优选为80at％以上。另一方面，为了将结晶度设为3％以下来降低压粉磁芯的磁芯损耗，Fe的比例优选为83.5at％以下。

[0031] 在本实施方式的软磁性粉末中，Si元素是承担非晶相形成的元素，在纳米结晶化时有助于纳米结晶的稳定化。为了降低压粉磁芯的磁芯损耗， Si的比例需要设为小于6at％(包含零)。另一方面，为了使Fe基纳米晶合金粉末的饱和磁通密度Bs提高，Si的比例优选为2at％以上，为了使ΔT 变大，Si的比例进一步优选为3at％以上。

[0032] 在本实施方式的软磁性粉末中，B元素是承担非晶相形成的必要元素。为了通过将软磁性粉末的结晶度控制在10％以下来降低压粉磁芯的磁芯损耗，B的比例需要设为4at％以上且10at％以下。此外，为了通过将软磁性粉末的结晶度控制在3％以下来进一步降低压粉磁芯的磁芯损耗，B的比例优选设为8.5at％以下。

[0033] 在本实施方式的软磁性粉末中，P元素是承担非晶相形成的必要元素。如所述那样，本实施方式的P的比例优选为大于4at％且为11at％以下。具体而言，在P的比例大于4at％的情况下，制造软磁性粉末时的合金熔融金属的粘性降低，从使压粉磁芯的磁特性提高这样的观点出发，制造优选的球形状的软磁性粉末变得容易。另外，由于熔点降低能够使非晶形成能力提高，制造Fe基纳米晶合金粉末变得容易。这样的效果有助于具有10％以内的结晶度的软磁性粉末的制造。另一方面，为了在Fe基纳米晶合金粉末中得到所需的饱和磁通密度Bs，P的比例需要设为11at％以下。此外，为了使耐腐蚀性提高，P的比例优选大于5.0at％，由于将结晶度设为3％以下，P的比例进一步优选5.5at％以上，为了将Fe基纳米晶合金粉末中的纳米结晶细微化且将压粉磁性的磁芯损耗降低，P的比例进一步优选6at％以上。另一方面，为了使饱和磁通密度Bs提高，P的比例优选为10at％以下，进一步优选为8at％以下。

[0034] 在本实施方式的软磁性粉末中，Cu元素是有助于纳米结晶化的必要元素。如所述那样，本实施方式的Cu的比例为0.2at％以上且小于0.4at％。通过将Cu的比例降低到0.2at％以上且小于0.4at％，从而能够得到Fe基纳米晶合金粉末中的纳米结晶的细微化这样的效果，能够使非晶形成能力提高。其结果是能够抑制由前期析出物引起的Fe基纳米晶合金粉末的磁特性的劣化。具体而言，为了防止Fe基纳米晶合金粉末中的纳米结晶的粗化而在压粉磁芯中得到所需的磁芯损耗，Cu的比例需要设为0.2at％以上，由于充分的非晶形成能力，为了将结晶度控制在10％以下，Cu的比例需要设为小于0.4at％。此外，为了将Fe基纳米晶合金粉末中的纳米结晶细微化且将压粉磁性的磁性损耗降低，Cu的比例优选为0.3at％以上，为了将纳米结晶的析出量增加且使Fe基纳米晶合金粉末的饱和磁通密度Bs提高，Cu的比例进一步优选为0.35at％以上。

[0035] 本实施方式的软磁性粉末除了Fe、P、Cu、Si、及B之外，也可以包含原料中所含有的Al、Ti、S、O、N等不可避免的杂质。但是，这些不可避免的杂质成为软磁性粉末中的αFe的微结晶(前期析出物)的结晶核且容易促进结晶化。特别地，在这些不可避免的杂质的软磁性粉末中的比例 (含量)大的情况下，结晶度容易变高，且αFe的微结晶的粒径的偏差容易变

大。因此，软磁性粉末中的不可避免的杂质的含量优选为尽可能小。

[0036] 在本实施方式的说明中，软磁性粉末的主要成分元素(Fe、P、Cu、Si、及B)的含量用at％表示。此外，在以下的说明中，为了将软磁性粉末的特性提高而向主要成分元素添加的元素(例如，将软磁性粉末的耐腐蚀性提高的Cr、使软磁性粉末的非晶性提高的Nb、Mo等的元素)含量用at％表示。另一方面，在以下的说明中，想要尽可能少地对软磁性粉末的特性给与不好的影响，但是将考虑到制造工艺、原料价格等而混入的杂质元素的含量用质量％(mass％)表示。

[0037] 在上述不可避免的杂质中，Al是通过使用Fe-P、Fe-B等工业原料而混入到软磁性粉末中的微量元素。Al向软磁性粉末的混入时，软磁性粉末中的非晶相的比例降低且软磁特性的降低。为了抑制非晶相的比例的降低，Al的含量优选为0.1质量％以下。为了抑制非晶相的比例的降低且抑制软磁特性的降低，Al的含量进一步优选为0.01质量％以下。

[0038] 在上述不可避免的杂质中，Ti是通过使用Fe-P、Fe-B等的工业原料而混入到软磁性粉末中的微量元素。Ti向软磁性粉末的混入时，软磁性粉末中的非晶相的比例降低且软磁特性的降低。为了抑制非晶相的比例的降低，Ti的含量优选为0.1质量％以下。为了抑制非晶相的比例的降低且抑制软磁特性的降低，Ti的含量进一步优选为0.01质量％以下。

[0039] 在上述不可避免的杂质中，S是通过使用Fe-P、Fe-B等的工业原料而混入到软磁性粉末中的微量元素。通过将S微量地添加到软磁性粉末中，从而容易制造球形状的软磁性粉末。但是，在软磁性粉末中过量地混入S 时，αFe的微结晶的粒径的偏差变大，由此软磁特性的降低。为了抑制软磁特性的降低，S的含量优选为0.1质量％以下，进一步优选为0.05质量％以下。

[0040] 在上述不可避免的杂质中，O是由工业原料的使用混入到软磁性粉末中，并且在雾化时、干燥时从水、空气中混入到软磁性粉末的微量元素。特别在使用水雾化的情况下，已知由于粉末粒径变小而粉末的表面积变大，从而O含量容易变大。当O混入到软磁性粉末中时，软磁性粉末中的非晶相的比例降低并且成型软磁性粉末时填充率降低，且软磁特性降低。为了抑制非晶相的比例的降低，O的含量优选为1.0质量％以下。为了抑制成型软磁性粉末时的填充率的降低且抑制软磁特性的降低，O的含量进一步优选为0.3质量％以下。

[0041] 在上述不可避免的杂质中，N是由工业原料的使用混入到软磁性粉末中，并且在热处理时从空气中混入到软磁性粉末的微量元素。当N混入到软磁性粉末中时，软磁性粉末中的非晶相的比例降低并且成型软磁性粉末时填充率降低，且软磁特性降低。为了抑制非晶相的比例的降低且软磁特性的降低，N的含量优选为0.01质量％以下，进一步优选为0.002质量％以下。

[0042] 如所述那样，除了不可避免的杂质外软磁性粉末的组成式为 $Fe_aSi_bB_cP_dCu_e$表示。因此，不可避免的杂质中特别是包含由Al、Ti、S、O 及N组成的不可避免的杂质的软磁性粉末的组成式为$(Fe_aSi_bB_cP_dCu_e)_{100-\alpha}\ X_\alpha$。在该组成式中，X为由Al、Ti、S、O及N组成的可不避免的杂质，α为包含在软磁性粉末中的X比例(质量％)。此外，a、b、c、d、e(at％) 的优选范围为如前所述。

[0043] 在软磁性粉末包含作为不可避免的杂质的从Al、Ti、S、O、N中选择的一种以上的元素的情况下，优选Al的含量为0.1质量％以下，Ti的含量为0.1质量％以下，S的含量为0.1质量％以下，O的含量为1.0质量％以下，N的含量为0.01质量％以下。因此，在该情况下，将软

磁性粉末所包含的 Al、Ti、S、O、N(不可避免的杂质X)的比例表示的α的值优选为1.31 质量%以下。

[0044] 在软磁性粉末包含作为不可避免的杂质的选自Al、Ti、S、O、N的一种以上的元素的情况下,优选Al的含量为0.01质量%以下,Ti的含量为 0.01质量%以下,S的含量为0.05质量%以下,O的含量为0.3质量%以下, N的含量为0.002质量%以下。因此,在该情况下,将软磁性粉末所包含的 Al、Ti、S、O、N(不可避免杂质X)的比例表示的α的值进一步优选为0.372质量%以下。

[0045] 在本实施方式的软磁性粉末中,也可以将Fe的一部分置换为选自Cr、 V、Mn、Co、Ni、Zn、Nb、Zr、Hf、Mo、Ta、W、Ag、Au、Pd、K、Ca、 Mg、Sn、C、Y以及稀土元素之中的一种以上的元素。通过该置换,通过热处理容易得到均匀的纳米结晶。但是,在该置换中,在Fe中置换为上述元素的原子量(置换原子量)需要设为对磁特性、非晶形性能、熔点等的溶解条件以及原料价格没有不好影响的范围内。更具体而言,优选的置换原子量为Fe的3at%以下,进一步优选的置换原子量为Fe的1.5at%以下。

[0046] 如上述那样,将Fe的一部分进行置换的情况下的软磁性粉末的组成式为,除了不可避免的杂质之外的组份$(FeM)_aSi_bB_cP_dCu_e$。此外,在将Fe 的一部分置换的情况下还包含Al、Ti、S、O、N(不可避免杂质X)的软磁性粉末的组成式为$\{(FeM)_aSi_bB_cP_dCu_e\}_{100-\alpha}X_\alpha$(a、b、c、d、e为原子量%,α为质量%)。这些的组成式中的M为选自Cr、V、Mn、Co、Ni、 Zn、Nb、Zr、Hf、Mo、Ta、W、Ag、Au、Pd、K、Ca、Mg、Sn、C、Y 以及稀土元素之中的一种以上的元素。此外,a、b、c、d、e(at%)的优选范围为如前所述。

[0047] 以下,对于本实施方式的软磁性粉末、Fe基纳米晶合金粉末、磁性部件以及压粉磁性进行进一步详细的说明,并且对其制造方法进行说明。

[0048] 本实施方式的软磁性粉末能够使用各种制造方法制造。例如,软磁性粉末也可以利用如水雾化法、气体雾化法那样的雾化法制造。采用雾化法的粉末制造工序中,首先准备原料。接着,以使原料成为规定的组成的方式进行秤量、熔解来制造合金熔液。此时,本实施方式的软磁性粉末因为熔点低,所以能够削减用于熔解的功耗。接着,将合金熔液从喷嘴排出,并使用高压的气体、水来分割为合金熔滴,由此制造微细的软磁性粉末。

[0049] 在上述的粉末制造工序中,用于分割的气体也可以是氩气、氮气等惰性气体。另外,为了提高冷却速度,也可以使刚分割后的合金熔滴与冷却用的液体、固体相接触来进行骤冷,还可以将合金熔滴再次分割而进一步微细化。在使用液体而用于冷却的情况下,例如也可以使用水、油。在使用固体而用于冷却的情况下,例如也可以使用旋转铜辊、旋转铝板。但是,冷却用的液体、固体不限于此,可以使用各种材料。

[0050] 在上述的粉末制造工序中,通过改变制造条件,能够调整软磁性粉末的粉末形状和粒径。根据本实施方式,由于合金熔融金属的粘性低,因此容易制造球形的软磁性粉末。为了降低结晶度,软磁性粉末的平均粒径优选为200μm以下,进一步优选为50μm以下。此外,在软磁性粉末的粒度分布极其广的情况是引起不希望的粒度偏析的成因。因此,软磁性粉末的最大粒径优选为200μm以下。

[0051] 在上述的粉末制造工序中,在将非晶相作为主相的软磁性粉末中析出前期析出物。当析出FeB、FeP等的化合物作为前期析出物时,磁特性显著恶化。根据本实施方式,能够抑制软磁性粉末中的FeB、FeP等的化合物的析出,前期析出物基本上是bcc的αFe(-Si)。在

本实施方式中，前期析出物的体积比不是各软磁性粉末中的前期析出物的体积比，而是制造出的软磁性粉末整体中的前期析出物整体的体积比。因此，只要制造的软磁性粉末整体中的前期析出物整体的体积为10％以内(3％以内)，则也可以包含非晶单相的软磁性粉末，也可以包含结晶度为10％以上的(3％以上) 的软磁性粉末。

[0052] 上述的软磁性粉末的粒径能够利用激光粒度分析仪进行评价。软磁性粉末的平均粒径能够根据评价的粒径进行计算。结晶度和前期析出物的粒径能够通过利用WPPD法(Whole-powder-pattern decomposition method:全粉末图谱分解法)对利用X射线衍射(XRD:X-ray diffraction)测定的结果进行解析来计算。能够根据X射线衍射结果的峰位置对αFe(-Si) 相、化合物相等析出相进行鉴定。此外，软磁性粉末的饱和磁化和保磁力 Hc能够使用振动试料型磁力仪(VSM:Vibrating Sample Magnetometer) 进行测定。包含磁通量密度Bs能够由测定的饱和磁化和密度进行计算。

[0053] 将本实施方式的软磁性粉末作为起始原料，能够制造本实施方式的Fe 基纳米晶合金粉末。更具体而言，如所述那样，通过对本实施方式的软磁性粉末实施基于规定的热处理条件的热处理，从而析出bccFe纳米结晶，由此得到本实施方式的Fe基纳米晶合金粉末。该热处理需要在第二结晶化开始温度(T_{x2})以下的温度下进行，以使得不使化合物相析出。具体而言，本实施方式的热处理需要在550℃以下的温度下进行。此外，热处理优选在氩气、氮气等惰性环境中300℃以上的温度下进行。但是，为了在Fe纳米晶合金粉末的表面形成氧化层而使耐腐蚀性、绝缘性提高，也可以在氧化环境中局部地进行热处理。此外，为了改善Fe纳米晶合金粉末的表面状态，也可以在还原环境中局部地进行热处理。此外，通过升温、降温速度、保持温度等的热处理条件，也可能在更高温下进行短时间的热处理、在更低温下进行长时间的热处理。

[0054] 在本实施方式的Fe纳米晶合金粉末中，当纳米结晶的平均粒径超过 50nm时，结晶磁性各向异性变大，软磁特性恶化。此外，当纳米结晶的平均粒径超过40nm时，软磁特性稍微下降。因此，纳米结晶的平均粒径优选为50μm以下，进一步优选为40μm以下。

[0055] 在本实施方式的Fe基纳米晶合金粉末中，在纳米结晶的结晶度小于 25％的情况下，饱和磁通密度Bs稍微提高，磁偏超过20ppm。另一方面，在纳米结晶的结晶度为40％以上的情况下，饱和磁通密度Bs提高到1.6T 以上，磁偏成为15ppm以下。因此，纳米结晶的结晶度优选为25％以上，进一步优选为40％以上。

[0056] 上述的Fe基纳米晶合金粉末的纳米结晶的平均粒径和结晶度与软磁性粉末相同，能够由XRD进行测定并评价。此外，Fe基纳米晶合金粉末的饱和磁通密度Bs和保磁力Hc与软磁性粉末相同，能够使用VSM进行测定并计算。

[0057] 对基于本实施方式的Fe基纳米晶合金粉末成型，能够制造磁性薄板等的磁性部件、压粉磁芯。此外，能够使用该压粉磁芯来制造变压器、电感器、电动机或发电机等磁性部件。本实施方式的Fe基纳米晶合金粉末以高体积比包含高磁化的纳米结晶(bccFe的αFe)。此外，通过αFe的细微化，结晶磁性各向异性低。此外，通过非晶相的正磁偏和αFe相的负磁偏的混相来降低磁偏。因此，通过使用本实施方式的Fe基纳米晶合金粉末，从而能够制造磁特性优异的具有高饱和磁通密度Bs和低磁芯损耗的压粉磁芯。

[0058] 根据本实施方式，能够替代Fe基纳米晶合金粉末，使用热处理前的软磁性粉末来制造磁性薄板等的磁性部件、压粉磁芯。例如，通过在将软磁性粉末成型为规定的形状后在

规定的热处理条件下实施热处理，由此能够制造磁性部件、压粉磁芯。此外，能够使用该压粉磁芯来制造变压器、电感器、电动机或发电机等磁性部件。以下，对使用了软磁性粉末的本实施方式的压粉磁芯的制造工序进行说明。

[0059] 在磁芯制造工序中，首先，将软磁性粉末与树脂等的绝缘性良好的粘合剂进行混合来造粒，从而得到造粒粉。在作为粘合剂而使用树脂的情况下，例如可以使用有机硅、环氧树脂、苯酚、三聚氰胺、聚氨酯、聚酰亚胺、聚酰胺酰亚胺。为了提高绝缘性、粘合性，也可以代替树脂、或与树脂一同使用磷酸盐、硼酸盐、铬酸盐、氧化物(氧化硅、氧化铝、氧化镁等)、无机高分子(聚硅烷、聚锗烷、聚锡烷、聚硅氧烷、聚倍半硅氧烷、聚硅氮烷、聚硼氮烷(Polyborazylene)、聚磷腈等)等材料作为粘合剂。此外，也可以并用多个粘合剂，还可以利用不同的粘合剂形成两层或其以上的多层结构的覆盖。粘合剂的量通常优选为0.1～10mass％左右，当考虑绝缘性及填充率时，则优选为0.3～6mass％左右。但是，粘合剂的量只要考虑粉末粒径、应用频率、用途等酌情决定即可。

[0060] 在磁芯制造工序中，接着，使用模具对造粒粉进行加压成型来得到压粉体。然后，对压粉体实施在规定的热处理条件下的热处理，同时进行结晶化和粘合材料的固化来得到压粉磁芯。上述的加压成型通常在室温下进行即可。由本实施方式的软磁性粉末制造造粒粉时使用耐热性高的树脂、披覆，例如通过在550℃以下的温度范围下进行加压成型，也能够将极其高密度的压粉磁芯成型。

[0061] 在磁芯制造的工序中，在对造粉粒进行加压成型时，为了提高填充率，并且抑制纳米晶化时的放热，也可以混合相较于本实施方式的软磁性粉末更软质的Fe、FeSi、FeSiCr、FeSiAl、FeNi、羰基铁粉等粉末。此外，也可以代替上述软质粉末或与上述的软质粉末一同混合粒径与本实施方式的软磁性粉末不同的任意的软磁性粉末。此时，相对于本实施方式的软磁性粉末的混合量优选为50mass％以下。

[0062] 本实施方式的压粉磁芯也可以通过与上述的磁芯制造工序不同的工序进行制造。例如，如所述那样，也可以使用本实施方式的Fe基纳米晶合金粉末来制造压粉磁芯。在这种情况下，与上述的磁芯制造工序相同来制造造粒粉即可。通过使用模具对造粒粉进行加压成型，从而能够制造压粉磁芯。

[0063] 如以上那样制造的本实施方式的压粉磁芯，无论制造工序如何，具有本实施方式的Fe基纳米晶合金粉末。同样地，将本实施方式的磁性部件具有本实施方式的Fe基纳米晶合金粉末。

[0064] 以下，一边参照多个实施例一边对本发明的实施方式更详细地进行说明。

[0065] (实施例1～5及比较例1～8)

[0066] 作为下述表1所记载的实施例1～5及比较例1～6的软磁性粉末的原料，准备了工业纯铁、硅铁、亚铁、硼铁、及电解铜。以成为表1中记载的实施例1～5及比较例1～6的合金组成的方式秤量原料，在氩气气氛中通过高频熔解进行熔解，制造了合金熔液。接着，将合金熔液通过水雾化法进行处理，制造了平均粒径32～48μm的合金粉末(软磁性粉末)。利用X射线衍射(XRD:X-ray diffraction)对软磁性粉末的析出相(析出物) 进行评价。此外，使用电炉在氩气环境中通过表1记载的热处理条件对软磁性粉末实施热处理。使用振动试样型磁力计(VSM:Vibrating Sample Magnetometer)测定热处理后的软磁性粉末(Fe基纳米晶合金粉末)的饱和磁通密度Bs。除了Fe基纳米晶合金粉末的制造外，还由热处理前的软磁

性粉末制造压粉磁芯。具体而言，使用2mass％的有机硅树脂对软磁性粉末进行造粒，使用外径13mm且内径8mm的模具，利用10ton/cm^{2}的成型压力进行成型，并实施固化处理。之后，使用电炉在氩气环境中通过表 1记载的热处理条件实施热处理来制造压粉磁芯。对包含在压粉磁芯的热处理后的软磁性粉末(Fe基纳米晶合金粉末)内的纳米结晶的平均粒径通过XRD进行测定并评价。使用交流BH分析仪对压粉磁芯测定 20kHz-100mT的磁芯损耗。此外，作为比较例7、8，使用FeSiCr和Fe无定形(FeSiB)的软磁性粉末来制造压粉磁芯，与实施例1～5及比较例1～ 6的压粉磁芯进行相同的测定和评价。将以上的测定和评价的结果显示在表1中。

[0067] [表1]

[0068]

	组份	热处理前	热处理条件	热处理后		
		析出物		(*1)	(*2)	(*3)
比较例1	$Fe_{82.42}Si_4B_{6.3}P_{6.2}Cu_{1.08}$	αFe+Com	400℃×30分	1.74	-	1250
比较例2	$Fe_{82.65}Si_4B_{6.5}P_6Cu_{0.85}$	αFe+Com	400℃×30分	1.73	-	1320
比较例3	$Fe_{82.89}Si_4B_{6.5}P_6Cu_{0.61}$	αFe	400℃×30分	1.73	26	630
比较例4	$Fe_{83}Si_4B_{6.5}P_6Cu_{0.5}$	αFe	420℃×30分	1.71	27	240
实施例1	$Fe_{83.11}Si_4B_{6.3}P_{6.2}Cu_{0.39}$	αFe	420℃×30分	1.72	25	90
实施例2	$Fe_{83.04}Si_4B_{6.5}P_{6.1}Cu_{0.36}$	αFe	420℃×30分	1.71	28	80
实施例3	$Fe_{83.19}Si_4B_6P_{6.5}Cu_{0.31}$	αFe	440℃×30分	1.69	31	100
实施例4	$Fe_{83.21}Si_4B_{6.3}P_{6.2}Cu_{0.29}$	αFe	440℃×30分	1.66	36	120
实施例5	$Fe_{83.29}S_{i4}B_{6.5}P_6Cu_{0.21}$	αFe	440℃×30分	1.67	48	160
比较例5	$Fe_{82.39}Si_4B_{7.5}P_6Cu_{0.11}$	αFe	460℃×30分	1.62	54	680
比较例6	$Fe_{82}Si_4B_8P_6Cu_0$	amo	460℃×30分	1.61	58	840
比较例7	FeSiCr	-	(*4)	1.63	-	230
比较例8	Fe无定形	-	380℃×30分	1.55	-	120

[0069] (*1)Fe基纳米晶合金粉末的饱和磁通密度Bs(T)

[0070] (*2)包含在压粉磁芯的Fe基纳米晶合金粉末内的纳米结晶的平均粒径(nm)

[0071] (*3)压粉磁芯的20kHz-100mT的磁芯损耗(W/cc)

[0072] (*4)不实施热处理。因此，Bs及磁芯损耗为不实施热处理而进行测定的结果。

[0073] 根据表1可知，比较例1～4的软磁性粉末包含0.5at％以上(0.4at％以上)的Cu，压粉磁芯的磁芯损耗增大。此外，比较例5、6的软磁性粉末也可以不包含Cu或者包含小于0.2at％的Cu，压粉磁芯的磁芯损耗增大。另一方面，实施例1～5的软磁性粉末包含0.21～0.39at％的范围的Cu，压粉磁芯的磁芯损耗比比较例7的压粉磁芯优异。特别地，实施例1～

3的软磁性粉末包含0.31～0.39at％的范围的Cu，压粉磁芯的磁芯损耗比比较例 8的压粉磁芯优异。此外，实施例1、2的热处理后的软磁性粉末(Fe基纳米晶合金粉末)具有1.7T以上的高饱和磁通密度Bs。从以上的测定结果，能够理解软磁性粉末所包含的Cu的比例优选为0.2at％以上且小于0.4at。此外，通过实施例5和比较例5的比较，能够理解Fe基纳米晶合金粉末内的纳米结晶的平均粒径优选为50nm以下。

[0074] (实施例6～13及比较例9～14)

[0075] 作为下述表2和3所记载的实施例6～13及比较例9～12的软磁性粉末的原料，准备了工业纯铁、硅铁、亚铁、硼铁、及电解铜。以成为表表 2和3中记载的实施例6～13及比较例9～12的合金组成的方式秤量原料，在氩气环境中通过高频熔解进行熔解，制造了合金熔液。接着，将合金熔液通过水雾化法进行处理，制造合金粉末(软磁性粉末)。接着，对软磁性粉末进行分级，制造具有表2中记载的平均粒径的多个种类的软磁性粉末。通过XRD对分级后的软磁性粉末的析出相(析出物)和结晶度进行评价。此外，使用电炉在氩气气氛中通过表2记载的热处理条件对分级后的软磁性粉末实施热处理。使用VSM测定热处理后的软磁性粉末(Fe基纳米晶合金粉末)的保磁力Hc和饱和磁通密度Bs。通过XRD对Fe基纳米晶合金粉末内的纳米结晶的平均粒径进行评价。此外，由分级后且热处理前的软磁性粉末制造压粉磁芯。具体而言，使用2mass％的有机硅树脂对软磁性粉末进行造粒，使用外径13mm且内径8mm的模具，利用10ton/cm^2的成型压力进行成型，并实施固化处理。之后，使用电炉在氩气气氛中通过表2记载的热处理条件实施热处理来制造压粉磁芯。使用交流BH分析仪对压粉磁芯测定20kHz-100mT的磁芯损耗。作为比较例13、14，使用FeSiCr 和Fe无定形(FeSiB)的软磁性粉末来制造压粉磁芯，与实施例6～13及比较例9～12的压粉磁芯进行相同的测定和评价。将以上的测定和评价的结果显示在表2和表3中。

[0076] [表2]

[0077]

	组份	热处理前		热处理条件
		软磁性粉末的平均粒径（μm）	软磁性粉末的结晶度（%）	
实施例6	$Fe_{83.04}Si_4B_{6.5}P_{6.1}Cu_{0.36}$	6	0.8	420℃×30分
实施例7		15	1.4	
实施例8		32	2.6	
实施例9		54	6.4	
比较例9		80	12.5	
比较例10		156	68	
比较例11		220	94	
实施例10	$Fe_{80.69}Si_4B_{8.0}P_7Cu_{0.31}$	24	0.2	450℃×30分
实施例11		48	0.5	
实施例12		78	1.4	
实施例13		140	4.8	
比较例12		260	64	
比较例13	FeSiCr	35	-	(*1)
比较例14	Fe 无定形	33	-	380℃×30分

[0078] (*1)不实施热处理。

[0079] [表3]

[0080]

	组份	热处理后			
		(*1)	(*2)	(*3)	(*4)
实施例6	$Fe_{83.04}Si_4B_{6.5}P_{6.1}Cu_{0.36}$	32	1.70	38	154
实施例7		42	1.71	34	118
实施例8		64	1.71	33	88
实施例9		124	1.71	36	210
比较例9		842	1.70	44	640
比较例10		4800	1.73	化合物相	2400
比较例11		6200	1.72	化合物相	3200
实施例10	$Fe_{80.69}Si_4B_{8.0}P_7Cu_{0.31}$	65	1.65	29	82
实施例11		48	1.66	31	78
实施例12		71	1.65	28	74
实施例13		92	1.67	29	180
比较例12		3400	1.64	化合物相	3300
比较例13	FeSiCr (*5)	420	1.64	-	230
比较例14	Fe 无定形	96	1.55	-	120

[0081] (*1)Fe基纳米晶合金粉末的保磁力Hc(A/m)

[0082] (*2)Fe基纳米晶合金粉末的饱和磁通密度Bs(T)

[0083] (*3)Fe基纳米晶合金粉末内的纳米结晶的平均粒径(nm)

[0084] (*4)压粉磁芯的20kHz-100mT的磁芯损耗(W/cc)

[0085] (*5)不实施热处理。因此,Hc、Bs及磁芯损耗为不实施热处理而进行测定的结果。

[0086] 由表2和表3可知,比较例9～12的软磁性粉末的结晶度比10％高。因此,即使实施用于纳米结晶化的热处理,热处理后的软磁性粉末(Fe基纳米晶合金粉末)的保磁力Hc和压粉磁芯的磁芯损耗的都显著增大。特别地,对于析出化合物相的比较例10～12的Fe基纳米晶合金粉末和压粉磁芯,磁特性显著恶化。另一方面,实施例6～13的软磁性粉末,其结晶度为10％以下,通过实施热处理,从而具有比较例13、14的Fe基纳米晶合金粉末以上的饱和磁通密度Bs。进而,实施例6～13的Fe基纳米晶合金粉末的保磁力Hc和压粉磁芯的磁性损耗比比较例的压粉磁芯优异。特别地,实施例6～8、10～12的软磁性粉末的结晶度降低到3％以下。因此,实施例6～8、10～12的软磁性粉末、压粉磁芯通过实施热处理比比较例 14的压粉磁芯具有优异的磁特性。

[0087] (实施例14～21及比较例15～20)

[0088] 作为下述表4和5所记载的实施例14～21及比较例15～18的软磁性粉末的原料,准备了工业纯铁、硅铁、亚铁、硼铁、及电解铜。以成为表表4和5中记载的实施例14～21及比较例15～18的合金组成的方式秤量原料,在氩气气氛中通过高频熔解进行熔解,制造了合金熔液。接着,将合金熔液通过水雾化法进行处理,制造了平均粒径36～49μm的合金粉末 (软磁性粉末)。通过XRD对软磁性粉末的析出相(析出物)和结晶度进行评价,使用VSM对软磁性粉末的饱和磁通密度Bs进行测定。此外,使用电炉在氩气气氛中通过表5记载的热处理条件对软磁性粉末实施热处理。使用VSM测定热处理后的软磁性粉末(Fe基纳米晶合金粉末)的饱和磁通密度Bs。除了Fe基纳米晶合金粉末的制造外,由热处理前的软磁性粉末制造压粉磁芯。具体而言,使用2mass％的有机硅树脂对软磁性粉末进行造粒,使用外径13mm且内径8mm的模具,利用10ton/cm^2的成型压力进行成型,并实施固化处理。之后,使用电炉在氩气气氛中通过表5记载的热处理条件实施热处理来制造压粉磁芯。使用交流BH分析仪对压粉磁芯测定20kHz-100mT的磁芯损耗。此外,作为比较例19、20,使用FeSiCr 和Fe无定形(FeSiB)的软磁性粉末来制造压粉磁芯,与实施例14～21 及比较例15～18的压粉磁芯进行相同的测定和评价。将以上的测定和评价的结果显示在表4和表5中。

[0089] [表4]

[0090]

	组份	热处理前		
		软磁性粉末的结晶度（%）	软磁性粉末的饱和磁通密度 Bs（T）	析出物
比较例15	$Fe_{85.72}Si_{1.5}B_{10.5}P_2Cu_{0.28}$	78	1.78	αFe+Com
实施例14	$Fe_{84.48}Si_1B_9P_{5.2}Cu_{0.32}$	9	1.54	αFe
实施例15	$Fe_{83.62}Si_2B_{8.6}P_{5.5}Cu_{0.28}$	6.8	1.56	αFe
实施例16	$Fe_{83.16}Si_3B_7P_{6.5}Cu_{0.34}$	2.9	1.58	αFe
实施例17	$Fe_{82.52}Si_{3.5}B_{7.5}P_{6.1}Cu_{0.38}$	1.8	1.57	αFe
实施例18	$Fe_{82.61}Si_0B_8P_9Cu_{0.39}$	1.2	1.55	αFe
实施例19	$Fe_{82.23}Si_{5.3}B_8P_{4.1}Cu_{0.37}$	2.4	1.56	αFe
比较例16	$Fe_{81.79}Si_9B_6P_3Cu_{0.21}$	25	1.66	αFe+Com
实施例20	$Fe_{80.54}Si_4B_8P_{7.1}Cu_{0.36}$	0.4	1.56	αFe
实施例21	$Fe_{79.12}Si_{5.9}B_{4.1}P_{10.5}Cu_{0.38}$	0	1.58	amo
比较例17	$Fe_{78.46}Si_{6.2}B_8P_7Cu_{0.34}$	0	1.54	amo
比较例18	$Fe_{77.18}Si_6B_9P_{7.5}Cu_{0.32}$	0	1.52	amo
比较例19	FeSiCr	-	-	-
比较例20	Fe无定形	-	-	-

[0091] [表5]

[0092]

	组份	热处理后		
		热处理条件	Fe基纳米晶合金粉末的饱和磁通密度Bs（T）	压粉磁芯的磁性损耗（W/cc）
比较例15	$Fe_{85.72}Si_{1.5}B_{10.5}P_2Cu_{0.28}$	400℃×30分	1.83	2850
实施例14	$Fe_{84.48}Si_1B_9P_{5.2}Cu_{0.32}$	400℃×30分	1.78	210
实施例15	$Fe_{83.62}Si_2B_{8.6}P_{5.5}Cu_{0.28}$	420℃×30分	1.71	170
实施例16	$Fe_{83.16}Si_3B_7P_{6.5}Cu_{0.34}$	420℃×30分	1.72	75
实施例17	$Fe_{82.52}Si_{3.5}B_{7.5}P_{6.1}Cu_{0.38}$	420℃×30分	1.71	80
实施例18	$Fe_{82.61}Si_0B_8P_9Cu_{0.39}$	400℃×30分	1.63	70
实施例19	$Fe_{82.23}Si_{5.3}B_8P_{4.1}Cu_{0.37}$	420℃×30分	1.66	165
比较例16	$Fe_{81.79}Si_9B_6P_3Cu_{0.21}$	440℃×30分	1.71	980
实施例20	$Fe_{80.54}Si_4B_8P_{7.1}Cu_{0.36}$	440℃×30分	1.65	70
实施例21	$Fe_{79.12}Si_{5.9}B_{4.1}P_{10.5}Cu_{0.38}$	460℃×30分	1.59	120
比较例17	$Fe_{78.46}Si_{6.2}B_8P_7Cu_{0.34}$	460℃×30分	1.57	370
比较例18	$Fe_{77.18}Si_6B_9P_{7.5}Cu_{0.32}$	460℃×30分	1.53	440
比较例19	FeSiCr	(*1)	1.63	230
比较例20	Fe无定形	380℃×30分	1.55	120

[0093] (*1)不实施热处理。因此，Bs及磁芯损耗为不实施热处理而进行测定的结果。

[0094] 从表4和表5可知，比较例15～18的软磁性粉末的组份范围为本发明的范围外，热处理后的软磁性粉末(Fe基纳米晶合金粉末)的饱和磁通密度Bs低，或者压粉磁芯的磁芯损耗比比较例19、20的压粉磁芯差。另一方面，实施例14～21的软磁性粉末的组份范围为本发明的范围内，通过将结晶度控制在10％以下来提高处理后的磁特性，且通过将结晶度控制在3％以下来进一步提高处理后的磁特性。从表4和表5可知，为了得到本发明的效果，优选将Fe的比例设为79at％以上且84.5at％以下，将Si的比例设为小于6at％(包含0)，将B的比例设为4at％以上且10at％以下，将P的比例设为大于4at％且11at％以下，将Cu的比例设为0.2at％以上且小于 0.4at％，特别地，为了将结晶度控制在3％以下，优选将Fe的比例设为83.5at％以下，将B的比例设为8.5at％以下，将P的比例设为5.5a％以上。此外，为了将Fe基纳米晶合金粉末的饱和磁通密度Bs提高到超过比较例19的饱和磁通密度Bs的1.64T以上，P的比例优选设为8at％以下。

[0095] (实施例22～30)

[0096] 作为下述表6和表7中记载的实施例22～30的软磁性粉末的原料，准备了工业纯

铁、硅铁、亚铁、硼铁、电解铜、铬铁、碳、铌、钼、钴、镍、锡、锌和锰。以成为表6和表7中记载的实施例22～30的合金组成的方式秤量原料，在氩气气氛中通过高频熔解进行熔解，制造了合金熔液。接着，将合金熔液通过水雾化法进行处理，制造了平均粒径32～48μm的合金粉末(软磁性粉末)。通过XRD对实施例22～30的软磁性粉末的析出相(析出物)和结晶度进行评价。此外，使用电炉在氩气气氛中通过表7记载的热处理条件对软磁性粉末实施热处理。使用VSM测定热处理后的软磁性粉末(Fe基纳米晶合金粉末)的饱和磁通密度Bs。除了Fe基纳米晶合金粉末的制造外，由热处理前的软磁性粉末制造压粉磁芯。具体而言，使用 2mass％的有机硅树脂对软磁性粉末进行造粒，使用外径13mm且内径8mm 的模具，利用10ton/cm^{2}的成型压力进行成型，并实施固化处理。之后，使用电炉在氩气气氛中通过表7记载的热处理条件实施热处理来制造压粉磁芯。使用交流BH分析仪对压粉磁芯测定20kHz-100mT的磁芯损耗。将以上的测定和评价的结果显示在表6和表7中。

[0097] [表6]

[0098]

	组份	热处理前	
		软磁性粉末的结晶度 (%)	析出物
实施例22	$Fe_{81.47}Si_3B_5P_{9.2}Cu_{0.33}Cr_1$	1.9	αFe
实施例23	$Fe_{82.17}Si_3B_5P_{8.5}Cu_{0.33}C_1$	0	无
实施例24	$Fe_{82.17}Si_3B_7P_7Cu_{0.33}Nb_{0.5}$	0.6	αFe
实施例25	$Fe_{82.17}Si_3B_7P_7Cu_{0.33}Mo_{0.5}$	1.0	αFe
实施例26	$Fe_{81.17}Si_3B_7P_6Cu_{0.33}Co_{2.5}$	0	无
实施例27	$Fe_{79.67}Si_{3.5}B_7P_{7.5}Cu_{0.33}Ni_2$	0	无
实施例28	$Fe_{82.27}Si_4B_8P_{5.1}Cu_{0.33}Zn_{0.3}$	1.5	αFe
实施例29	$Fe_{82.27}Si_4B_8P_{5.1}Cu_{0.33}Sn_{0.3}$	1.0	αFe
实施例30	$Fe_{82.27}Si_4B_8P_{5.1}Cu_{0.33}Mn_{0.3}$	1.3	αFe

[0099] [表7]

[0100]

	组份	热处理条件	热处理后	
			Fe基纳米晶合金粉末的饱和磁通密度Bs（T）	压粉磁芯的磁性损耗（kW/m^3）
实施例22	$Fe_{81.47}Si_3B_5P_{9.2}Cu_{0.33}Cr_1$	430℃×30分	1.59	142
实施例23	$Fe_{82.17}Si_3B_5P_{8.5}Cu_{0.33}C_1$	420℃×30分	1.65	113
实施例24	$Fe_{82.17}Si_3B_7P_7Cu_{0.33}Nb_{0.5}$	430℃×30分	1.63	107
实施例25	$Fe_{82.17}Si_3B_7P_7Cu_{0.33}Mo_{0.5}$	420℃×30分	1.62	110
实施例26	$Fe_{81.17}Si_3B_7P_6Cu_{0.33}Co_{2.5}$	430℃×30分	1.72	100
实施例27	$Fe_{79.67}Si_{3.5}B_7P_{7.5}Cu_{0.33}Ni_2$	440℃×30分	1.64	105
实施例28	$Fe_{82.27}Si_4B_8P_{5.1}Cu_{0.33}Zn_{0.3}$	420℃×30分	1.65	140
实施例29	$Fe_{82.27}Si_4B_8P_{5.1}Cu_{0.33}Sn_{0.3}$	420℃×30分	1.63	130
实施例30	$Fe_{82.27}Si_4B_8P_{5.1}Cu_{0.33}Mn_{0.3}$	420℃×30分	1.62	136

[0101] 当参照表6和表7时，在实施例22～30中，将Fe的一部分置换成Cr、Co、Ni、Zn、Mn、Nb、Mo、Sn、C。如表7所示，在实施例22～30中，热处理后的软磁性粉末(Fe基纳米晶合金粉末)的饱和磁通密度Bs为 1.59～1.72T，压粉磁芯的磁芯损耗为100～142kW/m^3。从该结构可以看出，即使在由任意的元素置换Fe的情况下，也能够得到1.54T以上的高饱和磁通密度和小于220kW/m^{3}的优异的磁芯损耗。特别地，当参照实施例26时，在由Co置换Fe的情况下，可理解为饱和磁通密度Bs提高。此外，在由C 置换Fe的情况下，能够得到结晶度低的粉末，且在由Nb、Mo置换Fe的情况下，可理解为得到优异的磁芯损耗。

[0102] (实施例31～48)

[0103] 作为下述表8和表9中记载的实施例31～48的软磁性粉末的原料，准备了工业纯铁、硅铁、亚铁、硼铁、电解铜、铬铁、碳、铬铁、Mn、Al、Ti及FeS。以成为表8中记载的实施例31～48的合金组成的方式秤量原料，在氩气气氛中通过高频熔解进行熔解，制造了合金熔液。接着，将合金熔液通过水雾化法进行处理，制造了平均粒径35μm的合金粉末(软磁性粉末)。通过XRD对实施例31～48的软磁性粉末的析出相(析出物)和结晶度进行评价。此外，使用电炉在氩气气氛中通过表9记载的热处理条件对软磁性粉末实施热处理。使用VSM测定热处理后的软磁性粉末(Fe基纳米晶合金粉末)的饱和磁通密度Bs。除了Fe基纳米晶合金粉末的制造外，由热处理前的软磁性粉末制造压粉磁芯。具体而言，使用2mass％的有机硅树脂对软磁性粉末进行造粒，使用外径13mm且内径8mm的模具，利用 10ton/cm^{2}的成型压力进行成型，并实施固化处理。之后，使用电炉在氩气气氛中通过表9记载的热处理条件实施热处理来制造压粉磁芯。使用交流 BH分析仪对压粉磁芯测定20kHz-100mT的磁芯损耗。将以上的测定和评价的结果显示在表9中。

[0104] [表8]

[0105]

	除了不可避免的杂质（包含右侧的微量元素）之外的组份	含有微量元素				
		Al（质量%）	Ti（质量%）	S（质量%）	O（质量%）	N（质量%）
实施例31	$Fe_{81.52}Si_{3.6}B_8P_{6.5}Cu_{0.38}$	0.002	0.001	0.004	0.08	0.0008
实施例32	$Fe_{81.52}Si_{3.6}B_8P_{6.5}Cu_{0.38}$	0.007	0.010	0.041	0.12	0.0013
实施例33	$Fe_{81.52}Si_{3.6}B_8P_{6.5}Cu_{0.38}$	0.09	0.002	0.03	0.18	0.0007
实施例34	$Fe_{81.52}Si_{3.6}B_8P_{6.5}Cu_{0.38}$	0.15	0.001	0.002	0.15	0.0018
实施例35	$Fe_{81.52}Si_{3.6}B_8P_{6.5}Cu_{0.38}$	0.004	0.009	0.05	0.24	0.0005
实施例36	$Fe_{81.52}Si_{3.6}B_8P_{6.5}Cu_{0.38}$	0.001	0.08	0.005	0.20	0.0011
实施例37	$Fe_{81.52}Si_{3.6}B_8P_{6.5}Cu_{0.38}$	0.002	0.17	0.02	0.11	0.0010
实施例38	$Fe_{81.52}Si_{3.6}B_8P_{6.5}Cu_{0.38}$	0.002	0.005	0.04	0.30	0.0010
实施例39	$Fe_{81.52}Si_{3.6}B_8P_{6.5}Cu_{0.38}$	0.003	0.007	0.10	0.25	0.0009
实施例40	$Fe_{81.52}Si_{3.6}B_8P_{6.5}Cu_{0.38}$	0.01	0.01	0.26	0.13	0.0012
实施例41	$Fe_{81.52}Si_{3.6}B_8P_{6.5}Cu_{0.38}$	0.006	0.004	0.009	0.19	0.0006
实施例42	$Fe_{81.52}Si_{3.6}B_8P_{6.5}Cu_{0.38}$	0.004	0.003	0.01	0.28	0.0015
实施例43	$Fe_{81.52}Si_{3.6}B_8P_{6.5}Cu_{0.38}$	0.005	0.002	0.012	0.90	0.0012
实施例44	$Fe_{81.52}Si_{3.6}B_8P_{6.5}Cu_{0.38}$	0.008	0.001	0.004	0.15	0.0019
实施例45	$Fe_{81.52}Si_{3.6}B_8P_{6.5}Cu_{0.38}$	0.003	0.002	0.003	0.14	0.005
实施例46	$Fe_{81.52}Si_{3.6}B_8P_{6.5}Cu_{0.38}$	0.01	0.001	0.008	0.22	0.018
实施例47	$Fe_{81.65}Si_3B_8P_6Cu_{0.35}Cr_1$	0.005	0.003	0.018	0.12	0.0010
实施例48	$Fe_{83.15}Si_{1.5}B_{8.5}P_6Cu_{0.35}C_{0.5}$	0.001	0.006	0.004	0.23	0.0009

[0106] [表9]

[0107]

	热处理前		热处理条件	热处理后	
	软磁性粉末的结晶度（%）	析出物		Fe基纳米晶合金粉末的饱和磁通密度Bs（T）	压粉磁芯的磁性损耗（kW/m^3）
实施例31	0	无	440℃×30分	1.66	80
实施例32	0	无	440℃×30分	1.66	85
实施例33	3	αFe	440℃×30分	1.64	150
实施例34	9	αFe	440℃×30分	1.63	196
实施例35	1	αFe	440℃×30分	1.64	120
实施例36	2	αFe	440℃×30分	1.63	140
实施例37	10	αFe	440℃×30分	1.64	200
实施例38	0	无	440℃×30分	1.66	75
实施例39	1	αFe	440℃×30分	1.66	98
实施例40	4	αFe	440℃×30分	1.64	160
实施例41	0	无	440℃×30分	1.66	85
实施例42	0	无	440℃×30分	1.65	91
实施例43	0	无	440℃×30分	1.63	100
实施例44	0	无	440℃×30分	1.66	88
实施例45	1	αFe	440℃×30分	1.65	98
实施例46	1	αFe	440℃×30分	1.65	107
实施例47	1	αFe	430℃×30分	1.63	110
实施例48	2	αFe	420℃×30分	1.69	145

[0108] 当参照表8时，实施例31～48以各种含量含有Al、Ti、S、N、O来作为微量元素。在实施例31～46中，具有相同Fe、Si、B、P及Cu的元素组成。当参照表9时，实施例31～48的结晶度降低到10％以下，实施例 31～48的饱和磁通密度Bs为1.63T以上的良好的值。实施例31～48的磁通损耗为220kW/m^{3}以下良好的值。当参照实施例31～34时，Al的含量增大，并且结晶度和磁芯损耗增加，且饱和磁通密度Bs降低。当考虑到结晶度、饱和磁通密度Bs及磁芯损耗时，Al的含量优选0.1质量％以下，从大大降低磁芯损耗的观点出发，进一步优选为0.01质量％以下。当参照实施例31和实施例35～37时，Ti的含量增大，并且结晶度和磁芯损耗增加，且饱和磁通密度Bs降低。当考虑到结晶度、饱和磁通密度Bs及磁芯损耗时，Ti的含量优选0.1质量％以下，从大大降低磁芯损耗的观点出发，优选为0.01质量％以下。当参照实施例31和实施例38～40时，S的含量增大，并且结晶度和磁芯损耗增加，且饱和磁通密度Bs降低。当考虑到结晶度、饱和磁通密度Bs及磁芯损耗时，S的含量优选0.1质量％以下，从大大降低磁芯损耗的观点出发，优选为0.05质量％以下。当参照实施例41～ 43时，O的含量增大，且磁芯损耗增加。从降低磁芯损耗这样的观点出发， O的含量优选为1质量％以下，进一步优选为0.3质量％以下。当参照实施例44～46时，N的含量增大，并且结晶度和磁芯损耗增加。从降低结晶度及磁芯损耗这样的观点出发，N的含量优选为0.01质量％以下，进一步优选为0.002质量％以下。

[0109] (实施例49～53)

[0110] 作为下述表10和11所记载的实施例49～53的软磁性粉末的原料，准备了工业纯

铁、硅铁、亚铁、硼铁、及电解铜。以成为表10和表11中记载的实施例49～53的合金组成的方式秤量原料，在氩气气氛中通过高频熔解进行熔解，制造了合金熔液。接着，将合金熔液通过水雾化法进行处理，制造了平均粒径40μm的合金粉末(软磁性粉末)。通过XRD对实施例49～ 53的软磁性粉末的析出相(析出物)和结晶度进行评价。此外，使用电炉在氩气气氛中通过表10记载的热处理条件对软磁性粉末实施热处理。使用 VSM测定热处理后的软磁性粉末(Fe基纳米晶合金粉末)的饱和磁通密度 Bs。除了Fe基纳米晶合金粉末的制造外，由热处理前的软磁性粉末制造压粉磁芯。具体而言，使用2mass％的有机硅树脂对软磁性粉末进行造粒，使用外径13mm且内径8mm的模具，利用10ton/cm^2的成型压力进行成型，并实施固化处理。之后，使用电炉在氩气气氛中通过表10记载的热处理条件实施热处理来制造压粉磁芯。使用交流BH分析仪对压粉磁芯测定 20kHz-100mT的磁芯损耗。此外，对于得到的压粉磁芯，实施60℃-90％ RH下的恒温恒湿试验，通过外观观察确认了腐蚀状况。将以上的测定和评价的结果显示在表10和表11中。

[0111] [表10]

[0112]

	组份	热处理前		热处理条件
		软磁性粉末的结晶度(％)	析出物	
实施例49	$Fe_{81.83}Si_4B_9P_{4.8}Cu_{0.37}$	4.0	αFe	420℃×30分
实施例50	$Fe_{81.53}Si_4B_9P_{5.1}Cu_{0.37}$	3.5	αFe	420℃×30分
实施例51	$Fe_{81.63}Si_4B_{8.5}P_{5.5}Cu_{0.37}$	2.4	αFe	420℃×30分
实施例52	$Fe_{81.83}Si_4B_8P_{5.8}Cu_{0.37}$	1.0	αFe	420℃×30分
实施例53	$Fe_{81.63}Si_{3.5}B_8P_{6.5}Cu_{0.37}$	0.5	αFe	420℃×30分

[0113] [表11]

[0114]

	组份	热处理后		
		Fe基纳米晶合金粉末的饱和磁通密度Bs(T)	压粉磁芯的磁性损耗(kW/m^3)	恒温恒湿试验
实施例49	$Fe_{81.83}Si_4B_9P_{4.8}Cu_{0.37}$	1.65	170	△
实施例50	$Fe_{81.53}Si_4B_9P_{5.1}Cu_{0.37}$	1.64	158	○
实施例51	$Fe_{81.63}Si_4B_{8.5}P_{5.5}Cu_{0.37}$	1.64	131	○
实施例52	$Fe_{81.83}Si_4B_8P_{5.8}Cu_{0.37}$	1.64	100	○
实施例53	$Fe_{81.63}Si_{3.5}B_8P_{6.5}Cu_{0.37}$	1.63	80	◎

[0115] 当参照表11时，在实施例49中仅在恒温恒湿试验后确认腐蚀，但可知在实施例50

～53中腐蚀状况得到改善。从该结果可知，软磁性粉末中的 P的比例优选为比5at％大。此外，实施例49和50的软磁性粉末的结晶度比3％大的一方面，实施例51～53的软磁性粉末的结晶度降低到3％以下。另外，实施例51～53的压粉磁芯的磁性损耗比实施例49和50的压粉磁芯低。从该结果可知，在软磁性粉末中，为了将结晶度设为3％以下，优选 Fe的比例为83.5at％以下，B的比例为8.5at％以下，且P的比例为5.5at％以下。进而，当参照实施例52和53时，可知通过将软磁性粉末的P的比例设为6at％以上，从而能够减少压粉磁芯的磁芯损耗。

[0116] 本发明是基于2017年1月27日在日本专利局提出的日本专利申请第 2017-012977号，通过参照其内容而成为本说明书的一部分。

[0117] 对本发明的最佳实施方式进行了说明，但本领域技术人员可以明确在不脱离本发明的精神的范围内能够对实施方式进行变形，这样的实施方式属于本发明的范围。