



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114974776 B

(45) 授权公告日 2025. 02. 07

(21) 申请号 202210609436.5

H01F 41/02 (2006.01)

(22) 申请日 2022.05.31

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 106128679 A, 2016.11.16

申请公布号 CN 114974776 A

CN 113851320 A, 2021.12.28

CN 113871123 A, 2021.12.31

(43) 申请公布日 2022.08.30

审查员 张婷婷

(73) 专利权人 烟台东星磁性材料股份有限公司

地址 265500 山东省烟台市福山区永达街  
888号

(72) 发明人 王传申 彭众杰 杨昆昆 董占吉  
丁开鸿

(74) 专利代理机构 青岛发思特专利商标代理有  
限公司 37212

专利代理师 李妥

(51) Int. Cl.

H01F 1/057 (2006.01)

权利要求书1页 说明书9页

(54) 发明名称

钕铁硼稀土磁体及其制备方法

(57) 摘要

本发明涉及一种钕铁硼稀土磁体及其制备方法,涉及稀土磁体制备技术领域,通过设计扩散源与磁体的配合扩散,进行扩散、时效处理,得到高性能无重稀土磁体。其中扩散源的制作方式是在扩散源薄片上镀一层无重稀土合金膜层,进行时效处理,形成新型扩散源,其中扩散源薄片是 $R_{\alpha}RH_{\delta}M_{\beta}B_{\gamma}Fe_{100-\alpha-\beta-\gamma-\delta}$ ,无重稀土膜层是化学式为 $R_nM_m$ ,进行时效处理,形成新型扩散源;钕铁硼磁体的化学式是 $R_aM_{1b}M_{2c}B_dFe_{100-a-b-c-d}$ ,磁体扩散含Dy扩散源后剩磁降低幅度低于0.15kGs, Hc j增加幅度大于8kOe,扩散含Tb扩散源后剩磁降低幅度低于0.15kGs, Hc j增加幅度大于11kOe。

1. 一种钕铁硼稀土磁体,其特征在于,所述钕铁硼磁体包括主相、重稀土壳层、晶界相和富稀土相,其中晶界相包含 $\mu$ 相或 $\delta$ 相, $\mu$ 相即 $R_{36.5}Fe_{63.5-x}M_x$ , $2.5 \leq x \leq 5$ ;  $\delta$ 相即 $R_{32.5}Fe_{67.5-y}M_y$ , $7 \leq y \leq 25$ ,上述中R是指Nd,Pr,Ce,La中的至少两种元素,M是指Al,Cu,Ga中的至少两种元素,比例是指原子百分比;

其中,所述钕铁硼稀土磁体的制备过程包括以下步骤:

(S1) 扩散源制作:熔炼合金薄片,所述合金薄片的化学式为 $R_\alpha RH_\delta M_\beta B_\gamma Fe_{100-\alpha-\beta-\gamma-\delta}$ ,其中 $15 \leq \alpha \leq 45$ , $20 \leq \delta \leq 70$ , $10 \leq \beta \leq 25$ , $0.2 \leq \gamma \leq 5$ ,R为Nd、Pr中至少一种,RH为Dy、Tb中至少一种,M为Al、Cu、Ga中至少一种,Fe含量低于5%,其中比例为质量百分比;将上述合金薄片表面镀一层无重稀土合金膜层,化学式为 $R_n M_m$ , $50 \leq n \leq 80$ , $20 \leq m \leq 50$ ,R为Nd、Pr、Ce、La中的至少一种,M为Al、Cu、Ga中的至少一种,进行时效处理,形成新型扩散源后进行吸氢和脱氢处理;

(S2) 钕铁硼薄片制作:配制钕铁硼磁体母材,其质量比化学式是 $R_a M^1_b M^2_c B_d Fe_{100-a-b-c-d}$ ,其中 $27 \leq a \leq 33$ , $0.5 \leq b \leq 3$ , $0.5 \leq c \leq 2.5$ , $0.8 \leq d \leq 1.2$ ,R是指Dy、Tb、Y、Ho、Gd、Nd、Pr、Ce、La中的一种或多种, $M^1$ 是指Al、Ga、Cu中的一种或多种, $M^2$ 是指Ti、Co、Mg、Zn、Nb、Zr、Mo、Sn中的一种或多种,剩余成分为Fe,将钕铁硼磁体母材制成钕铁硼薄片,比例为质量百分比;

(S3) 在钕铁硼薄片上涂覆一层新型扩散源膜层,进行扩散和时效处理,得到钕铁硼磁体。

2. 根据权利要求1所述的钕铁硼稀土磁体,其特征在于,步骤(S1)和步骤(S3)中的涂覆膜层的方法是喷涂涂覆镀膜、浸涂涂覆镀膜或丝网印刷涂覆镀膜中的任意一种。

3. 根据权利要求1所述的钕铁硼稀土磁体,其特征在于,步骤(S1)中时效处理温度是600-800°C;新型扩散源吸氢温度为50-200°C,脱氢温度为450-550°C。

4. 根据权利要求1所述的钕铁硼稀土磁体,其特征在于,步骤(S1)中所述新型扩散源粉末粒度为3-60 $\mu$ m。

5. 根据权利要求1所述的钕铁硼稀土磁体,其特征在于,步骤(S2)中将配制好的钕铁硼磁体母材经熔炼、速凝薄片,制得钕铁硼薄片。

6. 根据权利要求1所述的钕铁硼稀土磁体,其特征在于,步骤(S2)中将钕铁硼母材薄片和润滑剂混合进行氢处理,经气流磨制备混合粉末,将上述粉末压制成型,烧结得到钕铁硼磁体母材。

7. 根据权利要求6所述的钕铁硼稀土磁体,其特征在于,所述钕铁硼磁体母材的气流磨粉末粒度为2-5 $\mu$ m。

8. 根据权利要求6所述的钕铁硼稀土磁体,其特征在于,制备所述钕铁硼磁体母材烧结过程的烧结温度是980-1060°C,烧结时间为6-15h。

9. 根据权利要求1所述的钕铁硼稀土磁体,其特征在于,步骤(S3)中扩散温度为850-950°C,扩散时间为6-30h,一级时效温度为700-850°C,一级时效时间为2-10h,二级时效温度为450-600°C,二级时效时间为3-10h。

## 钕铁硼稀土磁体及其制备方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及钕铁硼稀土磁体技术领域,尤其涉及一种可以提高自身矫顽力的钕铁硼稀土磁体及其制备方法。

### 背景技术

[0002] 钕铁硼烧结永磁体广泛应用在电子信息、医疗设备、新能源汽车、家用电器、机器人等领域。在过去几十年的发展过程中,钕铁硼永磁体的研究得到快速的发展。尤其是扩散技术能够明显降低重稀土消耗,具有较大的成本优势。钕铁硼烧结永磁体制造过程中经常使用通过在母材中加入重稀土元素Dy、Tb的方式,这种方式会使重稀土元素Dy、Tb大量进入晶粒内部,降低了磁体的剩磁和磁能积,消耗了大量重稀土元素,增加了成本。另一种方式是晶界扩散,是通过热处理使扩散源沿晶界进入磁体内部以提高磁体矫顽力的技术。该技术使用较少的重稀土,能够大幅提高磁体的矫顽力,因其成本低廉而受到广泛关注。但是随着当前重稀土Dy、Tb原材的价格飞涨,纯Dy和Tb扩散的成本依然较高。重稀土合金的扩散技术可以在提高性能的同时,有效地降低磁体的制备成本。因此,发展重稀土合金的扩散技术,对钕铁硼磁体的大批量生产尤为重要。

[0003] 公开号为CN101641750B的专利公开了一种NdFeB系烧结磁体的制造方法,具有如下工序:将含有Rh的粉末涂布于NdFeB系烧结磁体后,通过加热该NdFeB系烧结磁体,使所述粉末中的Rh通过晶界扩散到所述NdFeB系烧结磁体中,其中,Rh为Dy和/或Tb,所述粉末含有金属状态的Al为0.5-50重量%,以及所述NdFeB烧结磁体中所含的氧量为0.4重量%以下。该专利主要是将不同的粉末混合制备扩散源,然后扩散进入磁体达到增加磁体矫顽力的目的。上述方法制备的扩散源,由于粉末的密度不同,在混合过程中会出现一定程度的聚集,会造成扩散后磁体性能不均匀,虽然扩散中有重稀土,但是扩散后矫顽力增加不多,达不到节约成本的目的。

[0004] 公开号CN106298219B公开了一种制备R-T-B稀土永磁体的方法,包括以下步骤,a)制备用做扩散源的 $R^L_u R^H_v Fe_{100-u-v-w-z} B_w M_z$ 稀土合金,所述的 $R^L$ 表示Pr、Nd中的至少一种元素, $R^H$ 表示Dy、Tb、Ho中的至少一种元素,M表示Co、Nb、Cu、Al、Ga、Zr、Ti中的至少一种元素,此稀土合金含有R-Fe-B四方晶的主相结构,u、v、w、z为各物质的重量百分数,u、v、w、z满足以下关系, $0 \leq u \leq 10, 35 \leq v \leq 70, 0.5 \leq w \leq 5, 0 \leq z \leq 5$ ;b)粉碎 $R^L_u R^H_v Fe_{100-u-v-w-z} B_w M_z$ 稀土合金,形成合金粉;c)所述的合金粉与R-T-B磁体一起装入旋转扩散装置进行热扩散,温度区间为750-950°C,时间区间为4-72h;d)进行时效处理,所述的旋转扩散装置内加入起分散或缓冲作用的陪料物质,该陪料物质为金属铁基材料、钛基材料的一种或多种,或非金属的氧化铝、氧化锆的一种或多种,陪料物质粒径 $< 10\mu m$ ,所述的旋转扩散装置内还可以加入防粘粉体,防粘粉体为氧化铝、氧化锆、氧化镉、氧化铽、氟化镉、氟化铽的一种或多种,防粘粉粒径 $< 100\mu m$ 。该发明采用的扩散源合金为扩散源的 $R^L_u R^H_v Fe_{100-u-v-w-z} B_w M_z$ 稀土合金。该技术中存在以下问题:①使用的扩散源中含B量过高时,其熔点会相对较高,不容易扩散到磁体中,M中Ti、Zr、Nb均是高熔点元素,不容易扩散到磁体中。②根据扩散源公式可知扩散中的Fe含

量 $\geq 10\%$ ,铁含量过高,扩散后形成过多的铁磁性相,钕铁硼磁体的性能降低,虽然磁体的 $H_cj$ 有所提高,但是造成 $Br$ 下降幅度大,不利于提高整体性能。虽然扩散源中含有重稀土,但是扩散后矫顽力增加不多,剩磁下降较多,达不到理想性能。

[0005] 公开号为CN113593800A的专利公开了一种高性能烧结钕铁硼磁体及其制备方法,其中 $RH_xM_1B_z$ ,所述的 $RH$ 选自 $Dy$ 、 $Tb$ 中的一种或两种元素, $M_1$ 选自 $Ti$ 、 $Zr$ 、 $Al$ 元素中的一种、两种或三种元素, $B$ 为硼元素, $x$ 、 $y$ 、 $z$ 代表元素的重量百分数, $x$ 、 $y$ 、 $z$ 满足以下关系: $75\% \leq x \leq 90\%$ , $0.1\% \leq z \leq 0.5\%$ , $y = 1 - x - z$ 。一方面,该方法通过在可拆卸的物料反应桶里面进行扩散提高了烧结钕铁硼磁体的 $H_cj$ ,解决了扩散过程提效的问题,外观黏着的问题,矫顽力稍有提高,但是扩散源长期使用必定会造成一定的氧化、氮化,反而造成重稀土利用率的进一步降低,成本提高。另一方面,扩散源中含有 $Ti$ 或 $Zr$ 时,其熔点会相对较高,从而导致扩散速率低,同样重稀土含量的情况下,剩磁下降较多,磁体矫顽力未有进一步提高,采用的三级升降温热处理方式是常规生产工艺。最后,扩散后剩磁下降较多,未能使磁体扩散的矫顽力明显提高。

[0006] 基于以上技术分析,重稀土合金扩散源遇到以下两个问题:一方面扩散源熔点过高,导致扩散速率低,提升矫顽力有限;另一方面扩散过程中重稀土含量过高或者 $Fe$ 含量过高磁体的剩磁下降较多,导致不能大幅提高磁体性能。

## 发明内容

[0007] 发明目的:为了克服现有技术中存在的不足,本发明提供一种钕铁硼稀土磁体及其制备方法。

[0008] 技术方案:为实现上述目的,本发明的一种钕铁硼稀土磁体,所述钕铁硼磁体包括主相、重稀土壳层、晶界相和富稀土相,其中晶界相包含 $\mu$ 相或 $\delta$ 相, $\mu$ 相即 $R_{36.5}Fe_{63.5-x}M_x$ , $2.5 \leq x \leq 5$ ;  $\delta$ 相即 $R_{32.5}Fe_{67.5-y}M_y$ , $7 \leq y \leq 25$ ,上述中 $R$ 是指 $Nd$ 、 $Pr$ 、 $Ce$ 、 $La$ 中的至少两种元素, $M$ 是指 $Al$ 、 $Cu$ 、 $Ga$ 中的至少两种元素,比例为原子百分比。

[0009] 一种制备所述的钕铁硼稀土磁体的方法,包括以下步骤,

[0010] (S1) 扩散源制作:熔炼合金薄片,化学式为 $R_\alpha RH_\delta M_\beta B_\gamma Fe_{100-\alpha-\beta-\gamma-\delta}$ ,其中 $15 \leq \alpha \leq 45$ , $20 \leq \delta \leq 70$ , $10 \leq \beta \leq 25$ , $0.2 \leq \gamma \leq 5$ , $R$ 为 $Nd$ 、 $Pr$ 中至少一种, $RH$ 为 $Dy$ 、 $Tb$ 中至少一种, $M$ 为 $Al$ 、 $Cu$ 、 $Ga$ 中至少一种, $Fe$ 含量低于 $5\%$ ;将上述合金薄片表面镀一层无重稀土合金膜层,化学式为 $R_n M_m$ , $50 \leq n \leq 80$ , $20 \leq m \leq 50$ , $R$ 为 $Nd$ 、 $Pr$ 、 $Ce$ 、 $La$ 中的至少一种, $M$ 为 $Al$ 、 $Cu$ 、 $Ga$ 中的至少一种,进行时效处理,形成新型扩散源后进行吸氢和脱氢处理,比例为质量百分比;

[0011] (S2) 钕铁硼磁体母材的质量比化学式是 $R_a M^1_b M^2_c B_d Fe_{100-a-b-c-d}$ ,其中 $27 \leq a \leq 33$ , $0.5 \leq b \leq 3$ , $0.5 \leq c \leq 2.5$ , $0.8 \leq d \leq 1.2$ , $R$ 是指 $Dy$ 、 $Tb$ 、 $Y$ 、 $Ho$ 、 $Gd$ 、 $Nd$ 、 $Pr$ 、 $Ce$ 、 $La$ 中的一种或多种, $M^1$ 是指 $Al$ 、 $Ga$ 、 $Cu$ 中的一种或多种, $M^2$ 是指 $Ti$ 、 $Co$ 、 $Mg$ 、 $Zn$ 、 $Nb$ 、 $Zr$ 、 $Mo$ 、 $Sn$ 中的多种组合,剩余成分为 $Fe$ ,将钕铁硼磁体母材制成钕铁硼薄片,比例为质量百分比;

[0012] (S3) 在钕铁硼薄片上涂覆一层新型扩散源膜层,进行扩散和时效处理,得到钕铁硼磁体。

[0013] 进一步地,步骤(S1)和步骤(S3)中的在合金薄片表面镀一层无重稀土合金膜层的方法是喷涂涂覆镀膜、浸涂涂覆镀膜或丝网印刷涂覆镀膜。

[0014] 进一步地,步骤(S1)中时效处理温度是 $600-800^\circ C$ ;新型扩散源进行吸氢和脱氢处

理,吸氢温度为50-200°C,脱氢温度为450-550°C。

[0015] 进一步地,步骤(S1)中所述新型扩散源粉末粒度为3-60 $\mu\text{m}$ 。

[0016] 进一步地,步骤(S2)中将配制好的钕铁硼磁体母材经熔炼、速凝薄片,制得钕铁硼薄片。

[0017] 进一步地,步骤(S2)中将钕铁硼母材薄片和润滑剂混合进行氢处理,经气流磨制备混合粉末,将上述粉末压制成型,烧结得到钕铁硼磁体母材。

[0018] 进一步地,所述钕铁硼磁体母材的气流磨粉末粒度为2-5 $\mu\text{m}$ 。

[0019] 进一步地,制备所述钕铁硼磁体母材烧结过程的烧结温度是980-1060°C,烧结时间为6-15h。

[0020] 进一步地,步骤(S3)中扩散温度为850-950°C,扩散时间为6-30h,一级时效温度为700-850°C,一级时效时间为2-10h,二级时效温度为450-600°C,二级时效时间为3-10h。

[0021] 本发明的一种钕铁硼稀土磁体及其制备方法,至少具有以下技术效果:

[0022] (1) 在合金薄片 $R_{\alpha}RH_{\delta}M_{\beta}B_{\gamma}Fe_{100-\alpha-\beta-\gamma-\delta}$ 进行低熔点化设计增加轻稀土元素的比例,降低Fe含量的比例,增加M的比例,同时表面涂覆一层低熔点 $R_nM_m$ 合金形成的复合扩散源能够有效地解决因少量的B含量导致扩散速度低,从而导致扩散性能降低的问题;该方法能够很好的将重稀土输送进入磁体,形成更多的重稀土壳层,有效地增加磁体的矫顽力,能够很好地提高扩散速度,特别是厚度大于6mm的钕铁硼磁体效果更加明显。

[0023] (2) 合金薄片 $R_{\alpha}RH_{\delta}M_{\beta}B_{\gamma}Fe_{100-\alpha-\beta-\gamma-\delta}$ 表面涂覆一层低熔点 $R_nM_m$ 合金形成的复合扩散源制成的粉末中含有B元素,能够有效地降低扩散过程中氧化问题,从而能够有效地利用扩散源,增加诸如扩散过程中重稀土易于与氧气结合,导致重稀土很难扩散进入磁体等导致元素利用率低的问题。

[0024] (3) 合金薄片 $R_{\alpha}RH_{\delta}M_{\beta}B_{\gamma}Fe_{100-\alpha-\beta-\gamma-\delta}$ 表面涂覆一层低熔点 $R_nM_m$ 合金形成的复合扩散源制成的粉末中含有B元素和Fe元素,扩散进入磁体形成新的主相,增加磁体的剩磁,抵消一部分扩散过程中剩磁的大幅度下降,剩磁下降幅度低于0.15Kgs,同时Fe元素能够与特殊磁体中的Al、Ga、Cu元素形成 $\mu$ 相和 $\delta$ 相,进一步增加磁体的矫顽力,综合性能增加幅度远大于纯Dy的增加幅度即剩磁Br的降幅 $\leq 0.15\text{Kgs}$ ,矫顽力 $H_cj$ 增加幅度 $\geq 8\text{kOe}$ ,典型增加幅度可以达到9kOe。

[0025] (4) 合金薄片 $R_{\alpha}RH_{\delta}M_{\beta}B_{\gamma}Fe_{100-\alpha-\beta-\gamma-\delta}$ 表面涂覆一层低熔点 $R_nM_m$ 合金形成的复合扩散源制成的粉末中含有B元素和Fe元素,Fe元素和B元素的比例最高可以达到10%,能够大幅度地降低扩散源的价格,从而降低生产成本。

[0026] (5) 该扩散源可以大批量制备,制成粉末后使用涂覆的方式可以达到近100%的利用效率,能够为大批量的磁体提供大量的扩散源,减少重稀土的使用,同时,该扩散源能够有效地增加磁体的磁能积,从而很好地降低生产成本,提高钕铁硼磁体产品生产过程中的核心竞争力。

[0027] (6) 制备的钕铁硼磁体母材只进行烧结,形成烧结态即可,无需进行一级时效和二级时效,机械加工后再进行扩散,时效,很好的降低生产成本,取得的最终产品性能优异。与现有技术对比,本发明实现了重稀土合金扩散源与相应成分的磁体相互配合,解决了大幅度增加磁体的矫顽力,降低轻稀土扩散过程中Br下降幅度大的难题。

## 具体实施方式

[0028] 以下对本发明的原理和特征进行描述,所举实例只用于解释本发明,并非用于限定本发明的范围。

[0029] 一种制备钕铁硼稀土磁体的方法,包括以下步骤,

[0030] (S1) 扩散源制作:按照表1配比扩散源合金成分,扩散源合金成分的化学式为 $R_a R H_b M_c B_d Fe_{100-a-b-c-d}$ ,放入真空熔炼炉中进行熔炼,浇筑形成合金薄片,合金薄片的平均厚度在0.25mm范围之内,合金薄片C、O元素的含量 $\leq 200\text{ppm}$ ,N含量 $\leq 50\text{ppm}$ ;利用喷涂涂覆镀膜的方法,将上述合金薄片表面镀一层无重稀土合金膜层,镀膜后将薄片放入烘干炉内进行 $\leq 150^\circ\text{C}$ 烘干,涂覆膜层的重量小于等于3%;按照表1配比无重稀土膜层成分,时效处理的温度为 $600-800^\circ\text{C}$ ,且时效过程中进行 $250-300^\circ\text{C}$ 除脂操作,新型扩散源在时效冷却过程中冷却温度低于 $40^\circ\text{C}$ ,冷却方式为循环气流快速冷却,冷却气体气氛是氩气或氦气等惰性气体;形成新型扩散源后进行吸氢和脱氢处理,新型扩散源的粉末粒度为 $3-60\mu\text{m}$ ,其中吸氢温度为 $50-200^\circ\text{C}$ ,脱氢温度为 $450-550^\circ\text{C}$ ,值得注意的是合金薄片摆放方式通过有间隙进行摆放,防止吸氢过程中局部温度过高造成粘片和难以取出等。

[0031] (S2) 按照表2配比钕铁硼母材合金,其质量比化学式为 $R_a M_b^1 M_c^2 B_d Fe_{100-a-b-c-d}$ ,将其放入真空熔炼内进行熔炼,浇筑形成钕铁硼母材薄片,冷却 $50^\circ\text{C}$ 后出料,薄片的平均厚度为0.25mm,C、O元素的含量 $\leq 200\text{ppm}$ ,N含量 $\leq 50\text{ppm}$ 。将钕铁硼母材薄片和润滑剂混合进行氢处理后经气流磨制备混合粉末,研磨气体为氩气,磨粉粒度为 $2-5\mu\text{m}$ 。将钕铁硼粉料放入自动压机,在磁场下压制成毛坯,包装成块。将成块的毛坯扒料放入烧结炉内进行烧结,烧结温度是 $980-1060^\circ\text{C}$ ,烧结时间为6-15h后进行机加工。

[0032] (S3) 利用喷涂涂覆镀膜的方法,在钕铁硼薄片上涂覆一层新型扩散源膜层,进行扩散和时效处理,得到钕铁硼磁体,具体工艺条件以及得到的钕铁硼磁体的性能如表3所示。

[0033] 为了验证本方案,设计了十八种对比例,对比例与实施例的区别是:对比例的扩散源合金成分中不含B和Fe元素,其成分、含量、工艺条件如表4所示;放入真空熔炼炉内进行熔炼,浇筑形成薄片,冷却 $50^\circ\text{C}$ 后出料,薄片的平均厚度为0.25mm,C、O含量 $\leq 200\text{ppm}$ ,N含量 $\leq 50\text{ppm}$ 。

[0034] 基于以上数据,通过扩散扩散源合金 $R_{2a} M_b B_c Fe_{100-a-b-c}$ 到稀土磁体,所有的实施例扩散后含Dy扩散 $\Delta Hc_j > 8\text{kOe}$ ,含Tb扩散 $\Delta Hc_j > 11\text{kOe}$ ,含DyTb扩散 $\Delta Hc_j > 9\text{kOe}$ 矫顽力增加明显,实施例剩磁降幅明显低于对比例,实施例矫顽力高于对比例。

[0035] 因此,将实施例与对比例具体分析如下:

[0036] 实施例1和对比例1:在相同的钕铁硼磁体及尺寸,相同的扩散温度和时效温度等条件下,相比扩散前,实施例1扩散后 $Br = 13.30\text{kGs}$ , $Hc_j = 26.00\text{kOe}$ ,含有 $\mu$ 相和 $\delta$ 相和对比例1扩散后 $Br = 13.15\text{kGs}$ , $Hc_j = 25\text{kOe}$ ,仅含有 $\delta$ 相,实施例的Br(剩磁)和 $Hc_j$ (矫顽力)优势明显高于对比例。

[0037] 实施例2和对比例2:在相同的钕铁硼磁体及尺寸,相同的扩散温度和时效温度等条件下,相比扩散前,实施例2扩散后 $Br = 12.75\text{kGs}$ , $Hc_j = 23\text{kOe}$ ,含有 $\mu$ 相和 $\delta$ 相和对比例2扩散后 $Br = 12.60\text{kGs}$ , $Hc_j = 22.5\text{kOe}$ ,仅含有 $\delta$ 相,实施例的Br(剩磁)和 $Hc_j$ (矫顽力)优势明显高于对比例。

[0038] 实施例3和对比例3:在相同的钕铁硼磁体及尺寸,相同的扩散温度和时效温度等条件下,相比扩散前,实施例3扩散后 $Br=14.75kGs$ , $Hc_j=24.5kOe$ ,含有 $\mu$ 相和 $\delta$ 相和对比例3扩散后 $Br=14.60kGs$ , $Hc_j=23kOe$ ,实施例的 $Br$ (剩磁)和 $Hc_j$ (矫顽力)优势明显高于对比例。

[0039] 实施例4和对比例4:在相同的钕铁硼磁体及尺寸,相同的扩散温度和时效温度等条件下,相比扩散前,实施例4扩散后 $Br=14.65kGs$ , $Hc_j=23kOe$ ,含有 $\mu$ 相和 $\delta$ 相和对比例4扩散后 $Br=14.50kGs$ , $Hc_j=22kOe$ ,实施例的 $Br$ (剩磁)和 $Hc_j$ (矫顽力)优势明显高于对比例。

[0040] 实施例5和对比例5:在相同的钕铁硼磁体及尺寸,相同的扩散温度和时效温度等条件下,相比扩散前,实施例5扩散后 $Br=14.5kGs$ , $Hc_j=23.5kOe$ ,含有 $\mu$ 相和 $\delta$ 相和对比例5扩散后 $Br=14.30kGs$ , $Hc_j=22kOe$ ,实施例的 $Br$ (剩磁)和 $Hc_j$ (矫顽力)优势明显高于对比例。

[0041] 实施例6和对比例6:在相同的钕铁硼磁体及尺寸,相同的扩散温度和时效温度等条件下,相比扩散前,实施例6扩散后 $Br=14.35kGs$ , $Hc_j=25kOe$ ,含有 $\mu$ 相和 $\delta$ 相和对比例6扩散后 $Br=14.2kGs$ , $Hc_j=24.5kOe$ ,实施例的 $Br$ (剩磁)和 $Hc_j$ (矫顽力)优势明显高于对比例。

[0042] 实施例7和对比例7:在相同的钕铁硼磁体及尺寸,相同的扩散温度和时效温度等条件下,相比扩散前,实施例7扩散后 $Br=14.15kGs$ , $Hc_j=26kOe$ ,含有 $\mu$ 相和 $\delta$ 相和对比例7扩散后 $Br=13.9kGs$ , $Hc_j=24.5kOe$ ,实施例的 $Br$ (剩磁)和 $Hc_j$ (矫顽力)优势明显高于对比例。

[0043] 实施例8和对比例8:在相同的钕铁硼磁体及尺寸,相同的扩散温度和时效温度等条件下,相比扩散前,实施例8扩散后 $Br=13.9kGs$ , $Hc_j=28kOe$ ,含有 $\mu$ 相和 $\delta$ 相和对比例8扩散后 $Br=13.7kGs$ , $Hc_j=26.5kOe$ ,实施例的 $Br$ (剩磁)和 $Hc_j$ (矫顽力)优势明显高于对比例。

[0044] 实施例9和对比例9:在相同的钕铁硼磁体及尺寸,相同的扩散温度和时效温度等条件下,相比扩散前,实施例9扩散后 $Br=14.00kGs$ , $Hc_j=26.5kOe$ ,含有 $\mu$ 相和 $\delta$ 相和对比例9扩散后 $Br=13.80kGs$ , $Hc_j=24.8kOe$ ,实施例的 $Br$ (剩磁)和 $Hc_j$ (矫顽力)优势明显高于对比例。

[0045] 实施例10和对比例10:在相同的钕铁硼磁体及尺寸,相同的扩散温度和时效温度等条件下,相比扩散前,实施例10扩散后 $Br=13.45kGs$ , $Hc_j=26.5kOe$ ,含有 $\mu$ 相和 $\delta$ 相和对比例10扩散后 $Br=13.3kGs$ , $Hc_j=24.5kOe$ ,仅含有 $\delta$ 相,实施例的 $Br$ (剩磁)和 $Hc_j$ (矫顽力)优势明显高于对比例。

[0046] 实施例11和对比例11:在相同的钕铁硼磁体及尺寸,相同的扩散温度和时效温度等条件下,相比扩散前,实施例11扩散后 $Br=13.35kGs$ , $Hc_j=27kOe$ ,含有 $\mu$ 相和 $\delta$ 相和对比例11扩散后 $Br=13.2kGs$ , $Hc_j=25kOe$ ,仅含有 $\delta$ 相,实施例的 $Br$ (剩磁)和 $Hc_j$ (矫顽力)优势明显高于对比例。

[0047] 实施例12和对比例12:在相同的钕铁硼磁体及尺寸,相同的扩散温度和时效温度等条件下,相比扩散前,实施例12扩散后 $Br=13.85kGs$ , $Hc_j=25.5kOe$ ,含有 $\mu$ 相和 $\delta$ 相和对比例12扩散后 $Br=13.65kGs$ , $Hc_j=23.5kOe$ ,实施例的 $Br$ (剩磁)和 $Hc_j$ (矫顽力)优势明显高于对比例。

[0048] 实施例13和对比例13:在相同的钕铁硼磁体及尺寸,相同的扩散温度和时效温度等条件下,相比扩散前,实施例13扩散后 $Br=13.85kGs$ , $Hcj=31kOe$ ,含有 $\mu$ 相和 $\delta$ 相和对比例13扩散后 $Br=13.7kGs$ , $Hcj=28.5kOe$ ,实施例的 $Br$ (剩磁)和 $Hcj$ (矫顽力)优势明显高于对比例。

[0049] 实施例14和对比例14:在相同的钕铁硼磁体及尺寸,相同的扩散温度和时效温度等条件下,相比扩散前,实施例14扩散后 $Br=13.75kGs$ , $Hcj=28kOe$ ,含有 $\mu$ 相和 $\delta$ 相和对比例14扩散后 $Br=13.6kGs$ , $Hcj=26.5kOe$ ,实施例的 $Br$ (剩磁)和 $Hcj$ (矫顽力)优势明显高于对比例。

[0050] 实施例15和对比例15:在相同的钕铁硼磁体及尺寸,相同的扩散温度和时效温度等条件下,相比扩散前,实施例15扩散后 $Br=13.35kGs$ , $Hcj=27kOe$ ,含有 $\mu$ 相和 $\delta$ 相和对比例15扩散后 $Br=13.25kGs$ , $Hcj=25kOe$ ,实施例的 $Br$ (剩磁)和 $Hcj$ (矫顽力)优势明显高于对比例。

[0051] 实施例16和对比例16:在相同的钕铁硼磁体及尺寸,相同的扩散温度和时效温度等条件下,相比扩散前,实施例16扩散后 $Br=13.4kGs$ , $Hcj=29kOe$ ,含有 $\mu$ 相和 $\delta$ 相和对比例16扩散后 $Br=13.25kGs$ , $Hcj=27kOe$ ,仅含有 $\delta$ 相,实施例的 $Br$ (剩磁)和 $Hcj$ (矫顽力)优势明显高于对比例。

[0052] 实施例17和对比例17:在相同的钕铁硼磁体及尺寸,相同的扩散温度和时效温度等条件下,相比扩散前,实施例17扩散后 $Br=12.6kGs$ , $Hcj=29kOe$ ,含有 $\mu$ 相和 $\delta$ 相和对比例17扩散后 $Br=12.5kGs$ , $Hcj=27kOe$ ,仅含有 $\delta$ 相,实施例的 $Br$ (剩磁)和 $Hcj$ (矫顽力)优势明显高于对比例。

[0053] 实施例18和对比例18:在相同的钕铁硼磁体及尺寸,相同的扩散温度和时效温度等条件下,相比扩散前,实施例18扩散后 $Br=13.6kGs$ , $Hcj=28kOe$ ,含有 $\mu$ 相和 $\delta$ 相和对比例18扩散后 $Br=13.45kGs$ , $Hcj=26.5kOe$ ,实施例的 $Br$ (剩磁)和 $Hcj$ (矫顽力)优势明显高于对比例。

[0054] 表1实施例中扩散源成分、含量

[0055]

编号	扩散源薄片比例	合金膜层比例
实施例1	Pr:30%,Tb:45%,Al:10%,B:4%,Fe:余量	Pr:82% Ga:18%
实施例2	Pr:30%,Tb:45%,Al:15%,B:3%,Fe:余量	Pr:70% Cu:20% Ga:10%
实施例3	Nd:20%,Tb:45%,Al:12%,Cu:13%,B:3%,Fe:余量	Pr:50% Cu:30% Ga:20%
实施例4	Pr:30%,Dy:45%,Al:10%,Ca:5%,B:5%,Fe:余量	Nd:60% Cu:40%
实施例5	Pr:30%,Dy:45%,Ga:10%,Cu:5%,B:5%,Fe:余量	Nd:70% Cu:20% Ga:10%
实施例6	Nd:30%,Tb:45%,Cu:15%,B:2%,Fe:余量	Pr:80% Al:20%
实施例7	Pr:30%,Dy:50%,Ga:10%,B:1%,Fe:余量	Nd:70% La:5% Cu:25%
实施例8	Pr:20%,Tb:50%,Ga:10%,Cu:10%,B:3%,Fe:余量	Pr:50% Ce:5% Cu:45%
实施例9	Pr:15%,Dy:70%,Cu:10%,B:2%,Fe:余量	Pr:75% La:6% Ga:19%
实施例10	Pr:15%,Dy:70%,Al:10%,B:0.5%,Fe:余量	Pr:60% Cu:40%
实施例11	Pr:15%,Dy:70%,Al:5%,Cu:5%,B:1%,Fe:余量	Pr:65% Ce:5% Cu:30%
实施例12	Nd:25%,Dy:60%,Cu:10%,B:0.5%,Fe:余量	Pr:75% Ga:25%
实施例13	Nd:25%,Tb:60%,Cu:10%,B:2%,Fe:余量	Pr:50% La:5% Cu:45%
实施例14	Nd:45%,Tb:30%,Cu:10%,Al:10%,B:2%,Fe:余量	Pr:75% La:6% Ga:19%

实施例15	Nd:30%,Dy:50%,Cu:10%,Ga:3%,B:4%,Fe:余量	Nd:70% Cu:30%
实施例16	Pr:20%,Dy:40%,Tb:10%,Cu:10%,Al:5%,B:5%,Fe:余量	Nd:65% Ce:5% Cu:30%
实施例17	Pr:20%,Tb:40%,Dy:10%,Cu:10%,Al:5%,B:4%,Fe:余量	Nd:50% Ga:10% Cu:40%
实施例18	Pr:30%,Dy:40%,Tb:10%,Cu:10%,B:2%,Fe:余量	Nd:50% Ga:25% Cu:25%

[0056] 表2各实施例中钕铁硼磁体母材成分、含量及磁体性能

编号	磁体成分														磁体性能					
	R							M1							M2			Br	Hc <sub>j</sub>	Hk/Hc
	Pr	Nd	Ce	Ho	Gd	Dy	Tb	Cu	Al	Ga	Co	Ti	Zr	Fe	B					
实施例 1	6.19	24.75	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.40	0.10	1.00	0.05	0.00	余量	0.92	13.40	14.60	0.98		
实施例 2	0.00	23.52	8.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.44	0.53	0.21	1.00	0.20	0.05	余量	0.94	12.80	11.50	0.98		
实施例 3	0.00	29.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.05	0.10	0.90	0.00	0.10	余量	0.92	14.85	12.00	0.98		
实施例 4	7.70	21.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.06	0.09	1.50	0.00	0.08	余量	0.91	14.73	13.90	0.98		
实施例 5	0.00	29.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.15	0.05	0.20	1.00	0.10	0.00	余量	0.94	14.60	15.00	0.98		
实施例 6	7.51	22.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	0.11	0.20	1.94	0.01	0.00	余量	0.90	14.40	16.40	0.98		
实施例 7	6.46	23.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.20	0.20	1.31	0.14	0.00	余量	0.95	14.27	16.00	0.98		
实施例 8	7.50	23.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.23	0.21	0.91	0.15	0.00	余量	0.95	13.98	16.50	0.99		
实施例 9	6.26	25.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.20	0.20	1.50	0.10	0.00	余量	0.94	14.10	16.06	0.98		
实施例 10	7.70	23.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.60	0.22	1.00	0.10	0.05	余量	0.90	13.60	17.05	0.99		
实施例 11	6.24	24.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.80	0.20	1.00	0.10	0.00	余量	0.98	13.46	17.80	0.99		
实施例 12	0.13	31.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.27	0.24	1.00	0.15	0.00	余量	0.94	13.90	16.00	0.98		
实施例 13	5.98	23.92	0.00	0.00	0.00	0.00	1.10	0.01	0.20	0.30	1.00	0.05	0.04	余量	0.91	13.95	19.50	0.98		
实施例 14	0.24	32.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.43	0.23	1.97	0.18	0.00	余量	0.97	13.75	17.00	0.98		
实施例 15	5.90	24.18	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.30	0.18	0.50	0.18	0.00	余量	0.93	13.40	18.55	0.99		
实施例 16	5.60	23.21	0.00	0.88	0.00	0.00	0.86	0.20	0.37	0.25	1.00	0.14	0.00	余量	0.95	13.50	19.00	0.98		
实施例 17	6.06	23.17	0.00	0.00	2.60	0.00	0.00	0.16	0.95	0.31	1.53	0.10	0.00	余量	0.94	12.66	19.12	0.99		
实施例 18	5.43	23.00	0.00	1.35	0.00	0.00	0.55	0.20	0.30	0.25	1.00	0.15	0.00	余量	0.94	13.70	18.00	0.98		

[0058] 表3各个实施例的工艺条件及成品磁体性能

[0059]

编号	扩散温度	保温时间	一级时效温度	一级时效时间	二级时效温度	二级时效时间	扩散后性能			是否含有 $\mu$ 相	是否含有 $\delta$ 相
							Br	Hc <sub>j</sub>	Hk/Hc <sub>j</sub>		
	°C	h	°C	h	°C	h					
实施例 1	850	30	700	2	510	10	13.30	26.00	0.97	是	是
实施例 2	900	15	700	3	480	7	12.75	23.00	0.96	是	是
实施例 3	850	30	700	5	500	5	14.75	24.50	0.96	是	是
实施例 4	900	10	700	8	530	8	14.65	23.00	0.97	是	是
实施例 5	900	20	750	10	540	6	14.50	23.50	0.97	是	是
实施例 6	910	20	750	2	600	5	14.35	25.00	0.96	是	是
实施例 7	920	20	750	3	500	3	14.15	26.00	0.97	是	是
实施例 8	910	15	750	5	460	6	13.90	28.00	0.97	是	是
实施例 9	930	16	800	8	450	8	14.00	26.50	0.96	是	是
实施例 10	940	10	800	10	520	6	13.45	26.50	0.97	是	是
实施例 11	930	20	800	2	600	5	13.35	27.00	0.97	是	是
实施例 12	950	20	800	3	500	8	13.85	25.50	0.97	是	是
实施例 13	910	15	800	5	450	8	13.85	31.00	0.97	是	是
实施例 14	850	10	850	8	500	6	13.75	28.00	0.96	是	是
实施例 15	950	30	850	10	520	10	13.35	27.00	0.96	是	是
实施例 16	910	10	850	3	500	5	13.40	29.00	0.97	是	是
实施例 17	930	6	850	5	600	3	12.60	29.00	0.96	是	是
实施例 18	940	8	850	8	580	8	13.60	28.00	0.97	是	是

[0060] 表4各对比例中扩散源成分、含量及工艺条件

[0061]

编号	扩散源薄片比例	合金膜层比例	扩散温度	保温时间	一级时效温度 t <sub>1</sub>	一级时效时间 t <sub>1</sub>	二级时效温度 t <sub>2</sub>	扩散后性能	是否含有μ相	是否含有δ相
实施例1	Pr:30%, Tb:45%, Al:10%, B: 4%, Fe:余量	Pr:82% Ga:18%	850	30	700	2	510	13.30	26.00	0.97
实施例2	Pr:30%, Tb:45%, Al:15%, B: 3%, Fe:余量	Pr:70% Cu:20% Ga:10%	900	15	700	3	480	12.75	23.00	0.96
实施例3	Nd:20%, Tb:45%, Al:12%, Cu: 13%, B: 3%, Fe:余量	Pr:50% Cu:30% Ga:20%	850	30	700	5	500	14.75	24.50	0.96
实施例4	Pr:30%, Dy:45%, Al:10%, Ca: 5%, B: 5%, Fe:余量	Nd:60% Cu:40%	900	10	700	8	530	14.65	23.00	0.97
实施例5	Pr:30%, Dy:45%, Ga:10%, Cu: 5%, B: 5%, Fe:余量	Nd:70% Cu:20% Ga:10%	900	20	750	10	540	14.50	23.50	0.97
实施例6	Nd:30%, Tb:45%, Cu:15%, B: 2%, Fe:余量	Pr:80% Al:20%	910	20	750	2	600	14.35	25.00	0.96
实施例7	Pr:30%, Dy:50%, Ga:10%, B: 1%, Fe:余量	Nd:70% La:5% Cu:25%	920	20	750	3	500	14.15	26.00	0.97
实施例8	Pr:20%, Tb:50%, Ga:10%, Cu: 10%, B: 3%, Fe:余量	Pr:50% Ce:5% Cu:45%	910	15	750	5	460	13.90	28.00	0.97
实施例9	Pr:15%, Dy:70%, Cu:10%, B: 2%, Fe:余量	Pr:75% La:6% Ga:19%	930	16	800	8	450	14.00	26.50	0.96
实施例10	Pr:15%, Dy:70%, Al:10%, B: 0.5%, Fe:余量	Pr:60% Cu:40%	940	10	800	10	520	13.45	26.50	0.97
实施例11	Pr:15%, Dy:70%, Al:5%, Cu: 5%, B: 1%, Fe:余量	Pr:65% Ce:5% Cu:30%	930	20	800	2	600	13.35	27.00	0.97
实施例12	Nd:25%, Dy:60%, Cu: 10%, B: 0.5%, Fe:余量	Pr:75% Ga:25%	950	20	800	3	500	13.85	25.50	0.97
实施例13	Nd:25%, Tb:60%, Cu: 10%, B: 2%, Fe:余量	Pr:50% La:5% Cu:45%	910	15	800	5	450	13.85	31.00	0.97
实施例14	Nd:45%, Tb:30%, Cu:10%, Al: 10%, B: 2%, Fe:余量	Pr:75% La:6% Ga:19%	850	10	850	8	500	13.75	28.00	0.96
实施例15	Nd:30%, Dy:50%, Cu:10%, Ca: 3%, B: 4%, Fe:余量	Nd:70% Cu:30%	950	30	850	10	520	13.35	27.00	0.96
实施例16	Pr:20%, Dy:40%, Tb:10%, Cu: 10%, Al:5%, B: 5%, Fe:余量	Nd:65% Ce:5% Cu:30%	910	10	850	3	500	13.40	29.00	0.97
实施例17	Pr:20%, Tb:40%, Dy:10%, Cu: 10%, Al:5%, B: 4%, Fe:余量	Nd:50% Ga:10% Cu:40%	930	6	850	5	600	12.60	29.00	0.96
实施例18	Pr:30%, Dy:40%, Tb:10%, Cu: 10%, B: 2%, Fe:余量	Nd:50% Ga:25% Cu:25%	940	8	850	8	580	13.60	28.00	0.97

[0062] 以上所述仅为本发明的较佳实施例,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。