



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104043834 B

(45)授权公告日 2016.08.24

(21)申请号 201410094229.6

H01F 1/057(2006.01)

(22)申请日 2014.03.14

(56)对比文件

(30)优先权数据

61/793167 2013.03.15 US

14/193113 2014.02.28 US

CN 1082759 A, 1994.02.23,

CN 102693799 A, 2012.09.26,

CN 1358595 A, 2002.07.17,

CN 1961388 A, 2007.05.09,

CN 1937112 A, 2007.03.28,

EP 0369462 A1, 1990.05.23,

(73)专利权人 通用汽车环球科技运作有限责任
公司

地址 美国密执安州

审查员 郑雪梅

(72)发明人 Y.王

(74)专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公
司 72001

代理人 冯春时 谭祐祥

(51)Int.Cl.

B22F 3/16(2006.01)

B22F 1/02(2006.01)

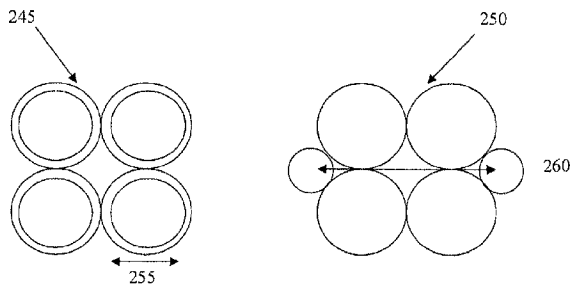
权利要求书2页 说明书12页 附图6页

(54)发明名称

使用热压利用减少的镨或铽制造Nd-Fe-B磁体

(57)摘要

本发明涉及使用热压利用减少的镨或铽制造Nd-Fe-B磁体,具体而言,使用热压或模锻方法或两者,通过将两种粉末组合并且优化Dy或Tb的晶界扩散来制造用于永磁体的磁材料的方法。该方法可包括利用热压制造用于永磁体的磁材料,其使用包含Nd、Fe和B的核粉末以及包含金属合金形式的Dy或Tb的表面粉末,将材料组合,在真空中、在磁场下、在有形状的模具中形成固体材料,加热固体材料,在模中对其热压以形成磁材料,如果需要进行处理,然后冷却它。



1. 一种使用热压来制造用于永磁体的磁材料的方法,包括:
提供:
包含Nd、Fe和B的核粉末形式的第一材料;
包含金属合金形式的Dy、Tb或此两者的表面粉末形式的第二材料;
将所述第一材料与所述第二材料组合,使得形成涂覆的、类复合物材料,其具有组成所述第二材料的Dy或Tb的非均匀分布;
在真空中、磁场下,在有形状的模具中形成磁材料;
将所述磁材料从5°C至35°C的第一范围加热到从500°C至850°C的第二范围;
在模中热压所述磁材料;以及
在真空中、惰性氛围下冷却所述磁材料达到1至5小时。
2. 如权利要求1所述的方法,其中,所述磁场从1至2.5特斯拉(T)。
3. 如权利要求1所述的方法,其中,加热所述磁材料包括加热所述磁材料并且将温度维持在从500°C至850°C的第二范围中达到0.5至2小时。
4. 如权利要求1所述的方法,其中,所述真空包括从10至2托。
5. 如权利要求1所述的方法,其中,所述惰性氛围包括Ar或N₂。
6. 如权利要求1所述的方法,其中,所述热压包括从30至90兆帕(MPa)。
7. 如权利要求1所述的方法,其中,所述热压包括从50至80兆帕(MPa)。
8. 如权利要求1所述的方法,其中,所述冷却从1至5小时。
9. 如权利要求1所述的方法,其中,所述第二材料包括从5wt%至80wt%的镧。
10. 如权利要求1所述的方法,其中,所述粉末是片状的。
11. 如权利要求10所述的方法,还包括在形成所述磁材料之前通过筛去而除去没有涂覆的片状粉末。
12. 如权利要求1所述的方法,其中,所述冷却包括冷却到5°C至35°C。
13. 如权利要求1所述的方法,还包括在热压之后和冷却之前进行时效化热处理,所述时效化热处理包括在10至2托的真空中、在包含Ar或N₂的惰性氛围之下以500°C至1000°C加热达到0.5至8小时。
14. 如权利要求1所述的方法,其中,在将所述第一材料与所述第二材料组合之后,所述第二材料形成1至100微米厚度的层。
15. 如权利要求1所述的方法,其中,在将所述第一材料与所述第二材料组合之后,所述第二材料形成10至50微米厚度的层。
16. 一种使用模锻来制造用于永磁体的磁材料的方法,包括:
提供:
包含Nd、Fe和B的核粉末形式的第一材料;
包含金属合金形式的Dy、Tb或此两者的表面粉末形式的第二材料;
将所述第一材料与所述第二材料组合,使得形成涂覆的、类复合物材料,其具有组成所述第二材料的Dy或Tb的非均匀分布;
在有形状的模具中形成固体材料;
将所述固体材料从5°C至35°C的第一范围加热到550°C至900°C的第二范围;
使所述固体材料变形20%至80%,以形成磁材料;以及

在真空中、惰性氛围下冷却所述磁材料达到1至5小时。

17. 如权利要求16所述的方法,其中,所述第二加热范围包括700°C至850°C。

18. 如权利要求16所述的方法,其中,所述第二加热范围包括650°C至750°C。

19. 一种使用热压和模锻来制造用于永磁体的磁材料的方法,包括:

提供:

包含Nd、Fe和B的核粉末形式的第一材料;

包含金属合金形式的Dy的表面粉末形式的第二材料;

将所述第一材料与所述第二材料组合,使得形成涂覆的、类复合物材料,其具有组成所述第二材料的Dy的非均匀分布;

在有形状的模具中形成固体材料;

将所述固体材料从5°C至35°C的第一范围加热到500°C至850°C的第二范围;

在模中热压所述固体材料;

在所述热压之后将所述固体材料加热到550°C至900°C的第三范围,其中,所述加热在热压之后执行;

使所述固体材料变形20%至80%,以形成磁材料;以及

在真空中、惰性氛围下冷却所述磁材料达到1至5小时。

20. 如权利要求19所述的方法,还包括在热压所述固体材料之后并且在使所述固体材料变形之前,在真空中、在惰性氛围之下冷却所述固体材料达到1至5小时。

使用热压利用减少的镝或铽制造Nd-Fe-B磁体

[0001] 交叉引用

[0002] 本申请要求2013年3月15日提交的美国临时申请61/793167的优先权。

技术领域

[0003] 本申请总体涉及使用热压(hot pressing)或模锻(die-upset,也称热变形)方法或两者,通过将两种粉末组合并且优化Dy的晶界扩散来制造用于永磁体的磁材料的方法。该方法还可包括利用热压制造磁材料,其使用包含Nd、Fe和B的核粉末以及包含金属合金形式的Dy和/或Tb的表面粉末,将材料组合,在真空中、在磁场下、在有形状的模具中形成磁材料,加热磁材料,在模中对磁材料热压,冷却磁材料,以及当需要时对磁材料进行热处理。

背景技术

[0004] 永磁体用在各种装置中,包括用于混合动力和电动车辆、以及风力涡轮机、空气调节单元和其它应用的牵引电机,其中小体积和高能密度的组合可能是有利的。烧结的钕铁硼(Nd-Fe-B)永磁体在低温条件下有很好的磁性质。然而,由于这种磁体中的Nd₂Fe₁₄B相的低居里温度,顽磁性和固有的矫顽磁性随着升高的温度而快速地下降。在高温下改善热稳定性和磁性质有两种常见的方法。一种是通过添加钴(Co)来提高居里温度,钴在Nd₂Fe₁₄B相中完全可溶。然而,带有Co的Nd-Fe-B磁体的矫顽磁性降低,可能是由于反转磁畴的成核点。第二种方法是添加重稀土(RE)元素,诸如镝(Dy)或铽(Tb)或两者。已知在Nd-Fe-B磁体中用Dy代替Nd或Fe导致各向异性场和固有矫顽磁性的增加和饱和磁化的降低。见例如C. S. Herget, Metal, Poed. Rep. V. 42, P.438 (1987);W. Rodewald, J. Less-Common Met., V111, P77 (1985);和D. Plusa, J. J. Wystocki, Less-Common Met. V. 133, P.231 (1987)。常用的实践是在熔融和合金化之前添加重RE金属(如Dy或Tb)到混合的金属中。

[0005] 然而,Dy和Tb是非常稀有且昂贵的材料。世界的RE矿中仅很小一部分包含重RE。最近,Dy的价格已经急剧增加。如果要求能够提供比Dy更高的磁性质,则需要Tb,其甚至比Dy更昂贵。此外,这些金属可能难以以它们相对纯净的形式工作,其中例如纯Dy太软而不能形成粉末,并且还易于被氧化。

[0006] 用于混合动力电动轿车和卡车中的牵引电机的典型磁体包含大约6wt%和10wt%之间的Dy,以满足所需的磁性质,而其它应用(诸如前述的风力涡轮机和空气调节器,以及其它运载构造(诸如摩托车,其可能不具有如同轿车和卡车那样高的操作温度环境)可以具有更低的Dy需求。假设永磁体块的重量是大约1-1.5kg每牵引电机,并且加工块的成品率典型地是大约55-65%,则每个电机将需要2-3kg的永磁体。此外,因为其它工业与永磁体竞争有限的Dy资源(由此使得与这种材料相关联的已经很高的成本更为严重),因此降低在永磁体中Dy的使用将具有非常重要的成本影响,对于Tb来说也是如此。

[0007] 为了改善主要由硬磁Nd₂Fe₁₄B相和非磁性富含Nd的相的这种磁体的磁性质,Nd-Fe-B烧结的磁体的微结构已经得到了广泛的研究。已知矫顽磁性很大地受Nd₂Fe₁₄B晶粒之

间的边界相的形态的影响。当磁体尺寸减小时Nd-Fe-B烧结的磁体的磁性质退化,因为加工的表面造成反转磁畴的成核。类似地,在他们名称为Improved magnetic properties of small-sized magnets and their application for DC brush-less micro-motors. Coll. Abstr. Magn. Soc. Jpn. 142 (2005), 25-30)的工作中,Machida等发现了小尺寸的Nd-Fe-B烧结的磁体的退化的矫顽磁性能能够通过利用Dy和Tb-金属蒸汽吸附形成的磁体的表面处理而被改善,使得在形成的磁体的外侧上具有Dy或Tb的均匀分布的涂层。尽管这种方法有助于改善已经利用Dy或Tb处理的磁体的性质,但他们通过采用很多这些珍贵材料而付出很大成本。

[0008] 当前实施例提供相对于烧结方法的优点和提供热压和/或模锻方法,以沿着晶界提高Dy分布并且增加Dy分布的非均匀性。

发明内容

[0009] 本文提供的具体实施例描述了一种使用热压来制造用于永磁体的磁材料的方法,包括:提供:包含Nd、Fe和B的核粉末形式的第一材料;包含金属合金形式的Dy、Tb或此两者的表面粉末形式的第二材料;将所述第一材料与所述第二材料组合,使得形成涂覆的、类复合物材料,其具有组成所述第二材料的Dy或Tb的非均匀分布;在真空中、磁场下,在有形状的模具中形成磁材料;将所述磁材料从大约5°C至大约35°C的第一范围加热到从大约500°C至大约850°C的第二范围;在模中热压所述磁材料;以及在真空中、惰性氛围下冷却所述磁材料达到大约1至大约5小时。

[0010] 本文提供的另外的具体实施例描述了一种使用模锻来制造用于永磁体的磁材料的方法,包括:提供:包含Nd、Fe和B的核粉末形式的第一材料;包含金属合金形式的Dy、Tb或此两者的表面粉末形式的第二材料;将所述第一材料与所述第二材料组合,使得形成涂覆的、类复合物材料,其具有组成所述第二材料的Dy或Tb的非均匀分布;在有形状的模具中形成固体材料;将所述固体材料从大约5°C至大约35°C的第一范围加热到大约550°C至大约900°C的第二范围;使所述固体材料变形大约20%至大约80%,以形成磁材料;以及在真空中、惰性氛围下冷却所述磁材料达到大约1至大约5小时。

[0011] 本文提供的另外的具体实施例描述了一种使用热压和模锻来制造用于永磁体的磁材料的方法,包括:提供:包含Nd、Fe和B的核粉末形式的第一材料;包含金属合金形式的Dy的表面粉末形式的第二材料;将所述第一材料与所述第二材料组合,使得形成涂覆的、类复合物材料,其具有组成所述第二材料的Dy的非均匀分布;在有形状的模具中形成固体材料;将所述固体材料从大约5°C至大约35°C的第一范围加热到大约500°C至大约850°C的第二范围;在模中热压所述固体材料;在所述热压之后将所述固体材料加热到大约550°C至大约900°C的第三范围,其中,所述加热在热压之后执行;使所述固体材料变形大约20%至大约80%,以形成磁材料;以及在真空中、惰性氛围下冷却所述磁材料达到大约1至大约5小时。

[0012] 此外,本发明还涉及以下技术方案。

[0013] 1. 一种使用热压来制造用于永磁体的磁材料的方法,包括:

[0014] 提供:

[0015] 包含Nd、Fe和B的核粉末形式的第一材料;

[0016] 包含金属合金形式的Dy、Tb或此两者的表面粉末形式的第二材料;

- [0017] 将所述第一材料与所述第二材料组合,使得形成涂覆的、类复合物材料,其具有组成所述第二材料的Dy或Tb的非均匀分布;
- [0018] 在真空中、磁场下,在有形状的模具中形成磁材料;
- [0019] 将所述磁材料从大约5℃至大约35℃的第一范围加热到从大约500℃至大约850℃的第二范围;
- [0020] 在模中热压所述磁材料;以及
- [0021] 在真空中、惰性氛围下冷却所述磁材料达到大约1至大约5小时。
- [0022] 2. 如技术方案1所述的方法,其中,所述磁场从大约1至大约2.5特斯拉(T)。
- [0023] 3. 如技术方案1所述的方法,其中,加热所述磁材料包括加热所述磁材料并且将温度维持在从大约500℃至大约850℃的第二范围中达到大约0.5至大约2小时。
- [0024] 4. 如技术方案1所述的方法,其中,所述真空包括从大约10至大约2托。
- [0025] 5. 如技术方案1所述的方法,其中,所述惰性氛围包括Ar或N₂。
- [0026] 6. 如技术方案1所述的方法,其中,所述热压包括从大约30至大约90兆帕(MPa)。
- [0027] 7. 如技术方案1所述的方法,其中,所述热压包括从大约50至大约80兆帕(MPa)。
- [0028] 8. 如技术方案1所述的方法,其中,所述冷却从大约1至大约5小时。
- [0029] 9. 如技术方案1所述的方法,其中,所述第二材料包括从大约5wt%至大约80wt%的镝。
- [0030] 10. 如技术方案1所述的方法,其中,所述粉末是片状的。
- [0031] 11. 如技术方案10所述的方法,还包括在形成所述磁材料之前通过筛去而除去没有涂覆的片状粉末。
- [0032] 12. 如技术方案1所述的方法,其中,所述冷却包括冷却到大约5℃至大约35℃。
- [0033] 13. 如技术方案1所述的方法,还包括在热压之后和冷却之前进行时效化热处理,所述时效化热处理包括在大约10至大约2托的真空中、在包含Ar或N₂的惰性氛围之下以大约500℃至大约1000℃加热达到大约0.5至大约8小时。
- [0034] 14. 如技术方案1所述的方法,其中,在将所述第一材料与所述第二材料组合之后,所述第二材料形成大约1至大约100微米厚度的层。
- [0035] 15. 如技术方案1所述的方法,其中,在将所述第一材料与所述第二材料组合之后,所述第二材料形成大约10至大约50微米厚度的层。
- [0036] 16. 一种使用模锻来制造用于永磁体的磁材料的方法,包括:
- [0037] 提供:
- [0038] 包含Nd、Fe和B的核粉末形式的第一材料;
- [0039] 包含金属合金形式的Dy、Tb或此两者的表面粉末形式的第二材料;
- [0040] 将所述第一材料与所述第二材料组合,使得形成涂覆的、类复合物材料,其具有组成所述第二材料的Dy或Tb的非均匀分布;
- [0041] 在有形状的模具中形成固体材料;
- [0042] 将所述固体材料从大约5℃至大约35℃的第一范围加热到大约550℃至大约900℃的第二范围;
- [0043] 使所述固体材料变形大约20%至大约80%,以形成磁材料;以及
- [0044] 在真空中、惰性氛围下冷却所述磁材料达到大约1至大约5小时。

- [0045] 17. 如技术方案16所述的方法,其中,所述第二加热范围包括大约700℃至大约850℃。
- [0046] 18. 如技术方案16所述的方法,其中,所述第二加热范围包括大约650℃至大约750℃。
- [0047] 19. 一种使用热压和模锻来制造用于永磁体的磁材料的方法,包括:
- [0048] 提供:
- [0049] 包含Nd、Fe和B的核粉末形式的第一材料;
- [0050] 包含金属合金形式的Dy的表面粉末形式的第二材料;
- [0051] 将所述第一材料与所述第二材料组合,使得形成涂覆的、类复合物材料,其具有组成所述第二材料的Dy的非均匀分布;
- [0052] 在有形状的模具中形成固体材料;
- [0053] 将所述固体材料从大约5℃至大约35℃的第一范围加热到大约500℃至大约850℃的第二范围;
- [0054] 在模中热压所述固体材料;
- [0055] 在所述热压之后将所述固体材料加热到大约550℃至大约900℃的第三范围,其中,所述加热在热压之后执行;
- [0056] 使所述固体材料变形大约20%至大约80%,以形成磁材料;以及
- [0057] 在真空中、惰性氛围下冷却所述磁材料达到大约1至大约5小时。
- [0058] 20. 如技术方案19所述的方法,还包括在热压所述固体材料之后并且在使所述固体材料变形之前,在真空中、在惰性氛围之下冷却所述固体材料达到大约1至大约5小时。

附图说明

- [0059] 图1是机械研磨机的示意图;
- [0060] 图2是基于火花腐蚀的粒子枪的示意图;
- [0061] 图3是基于高压溅射的粒子枪的示意图;
- [0062] 图4是漩涡涂覆机的示意图;
- [0063] 图5示出了磁材料的粒子,显示了核壳和晶界以及有限的体扩散;
- [0064] 图6显示了元素扩散;以及
- [0065] 图7显示了晶界扩散和磁相。

具体实施方式

[0066] 现在描述本公开的具体实施例。但是,本发明可以多种形式表现,不应当限于本文所述实施例地构造。相反,提供这些实施例使得本公开是全面且完整的,并向本领域技术人员完全表现本发明的范围。

[0067] 除非以其它方式限定,否则本文所使用的所有技术和科学术语具有与本发明的实施例所属领域的技术人员通常所理解的相同的含义。本文使用的术语仅用于描述具体的实施例且不限本发明。如说明书和所附权利要求中所使用的,除非在上下文中以其它方式明确地表示,否则单数形式“一”、“一个”和“所述”也包括复数形式。

[0068] 除非另外地指出,表达组分的量、性质的所有数字,诸如说明书和权利要求中所使

用的分子量、反应条件等应理解为在所有情况下由术语“大约”来修饰,其意味着达到所指出的值的 $\pm 10\%$ 。此外,说明书和权利要求中任何范围的公开都应理解为包括其自身的范围和包含在其中的任何事物以及端点。除非另有指出,说明书和权利要求中所述的数字性质是近似的,其可根据在本发明的实施例中想要获得的所需性质而变化。尽管本发明实施例的广泛范围所述的数字范围和参数是近似的,但特定示例中所述的数字值尽可能精确地报告。然而,任何数字值固有地包含它们相应测量中存在的误差必然导致的一定误差。

[0069] 如本文所用,术语“室温”指的是大约 5°C 至大约 35°C 的范围。

[0070] 如本文所用,术语“片状粉末”指的是具有大约5至大约40的宽度与厚度之比的片。在具体实施例中,片的表面可以是卷起的。

[0071] 本发明涉及制造工艺,通过工艺对磁体材料中的最终微结构和化学同质性的影响,降低了对于稀土/过渡金属/硼($\text{RE}_2\text{TM}_{14}\text{B}$, 诸如 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$)基磁体中过量的Dy或其它重稀土(HRE)的需求。以传统方式制造的磁体需要高达 $10\text{wt}\%$ 的HRE,以便维持对于退磁的充分阻力(矫顽磁性,“ H_c ”),同时在混合动力和电动汽车中所用的磁体中所见的较高的温度(大约 150°C)处保护较大的磁通(剩余感应“ B_r ”)。有成本效益的制造工艺可以被证明利用少得多的HRE导致所需的 H_c 和 B_r 。这通过利用少量的HRE仅选择性地加强($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$)晶粒的边界来实现,其中各个 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 晶粒具有磁隔离。

[0072] 本文研发的制造工艺基于较低温度(大约 500°C 至大约 1000°C)固结和热变形。本文使用的较低温度热压或热压加变形制造方法不同于传统的烧结方法(更短的工艺时间、在所需压力下的更低的工艺温度)。基于HRE表面源扩散的HRE晶界加强工艺已经被证明(所谓的晶界扩散工艺)。本文的制造方法的创新性在于,它是体材料制造方法,同时引起晶界加强和磁隔离,不需要低效率的表面源扩散工艺。本文所用的方法采用热压,接下来时效化,以降低温度和烧结及热处理工艺所需时间,以加强晶界扩散和最小化Dy和/或Tb的体扩散,以最大化对于Dy和/或Tb的减少,以获得相同所需的磁性质。这种新的方法还导致显著增加了关于热动力学($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$)-(富稀土共晶)系统、影响在热压和变形工艺中操作的沉淀-溶解工艺的动力学和物理学、微结构可以被引起导致在高温下保持耐退磁性的($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$)永磁体的程度的知识体系。

[0073] 本发明总体涉及电机及其制造,更具体地涉及使用稀土元素来改善电机的功率密度的永磁体的形成方法,尤其是重稀土元素,诸如Dy、Tb等,用于改善高温磁性质。

[0074] 名称为“Method Of Making Nd-Fe-B Sintered Magnets With Dy Or Tb”的2011年1月14日提交的美国专利申请13/007203中描述了比使用传统方法所制造的磁体使用少得多的Dy或Tb的磁体以及三种制造它们的方法,同时获得了相似的磁性质,该申请此后称为’203申请,现在为美国专利8480815号,该申请受让给本发明的受让人,并且在此通过引用而完整地结合在本文中。本发明的发明人已经发现通过热压和热处理工艺来进一步改进微结构、利用进一步降低的HRE来改进磁性质的方法。这样的改进是本发明的主题。

[0075] 由于与其它磁体相比的高的最大能积 $(BH)_{\text{max}}$ 和高矫顽磁性,烧结的(稀土)-Fe-B永磁体是用于混合动力机动车辆(HEV)和机动车辆(EV)的电机中的重要构件。矫顽磁性(H_c)和BH曲线的直角度是重要的考量,因为在电机操作期间的退磁场是很重要的。烧结的永磁体的室温应用的标准化学作用是基于Nd-Fe-B三元,其中主相具有化学计量的 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 。然而,在车辆中的永磁体的操作温度大约是 160°C ,由于低的居里温度(313°C),

Nd-Fe-B化学的BH积将剧烈下降到100℃之上,以增加的温度导致降低的饱和磁化和矫顽磁性。

[0076] 与Nd₂Fe₁₄B相比,Dy₂Fe₁₄B和Tb₂Fe₁₄B具有较高的居里温度和较高的各向异性常数。对于Nd₂Fe₁₄B、Dy₂Fe₁₄B和Tb₂Fe₁₄B来说,居里温度分别是585K、602K和639K。为了在如同混合动力车辆发动机中的较高的操作温度环境中保持高的矫顽磁性,添加大量的重稀土元素,诸如Dy,代替Nd,产生(Dy_xNd_(1-x))₂Fe₁₄B合金,使得居里温度和矫顽磁性提高。然而,利用重稀土(RE)元素替代Nd的缺点在于,其降低了磁体的顽磁性。这是因为它们与RE₂Fe₁₄B晶格中的Fe反铁磁性地耦合。此外,重稀土元素在自由市场上的可获得性当前受到威胁。因此,已经开始努力生产具有大的矫顽磁性、良好的高温能积的重稀土较少的磁体。

[0077] 升高的温度对磁性能的破坏通过诸如破裂、氧化物粒子、三叉晶界和具有低的磁各向异性的晶界的缺陷而加剧,并且作为反转磁畴的成核点。美国专利8480815B2和Hitachi工艺(US8206516)都被设计成局部地提高Nd₂Fe₁₄B基永磁体的晶界上的Dy含量,将重稀土放在其最需要处。尽管所提出的方法和Hitachi工艺之间在工艺程序和导致的微结构不均匀性方面存在差异,但两种方法的共同科学基础在于,利用重稀土(Dy)来加强Nd₂Fe₁₄B晶界。磁矩反转由反转畴的晶界成核引起。将Dy添加到Nd₂Fe₁₄B可以产生具有增加的矫顽磁性的(Nd,Dy)₂Fe₁₄B合金,尤其是在较高温度下。如果(Nd,Dy)₂Fe₁₄B合金的形成仅发生在晶界处,Dy可以被节省,同时产生高矫顽磁性的磁体。Dy是一种贵的元素,需要节省以降低高温磁体的成本。

[0078] 在1980年代通过使用结构和微磁性理论的详细分析来广泛地研究了矫顽磁性和微结构之间的关联(H. Kronmüller和M. Fähnle, *Micromagnetism and the Microstructure of Ferromagnetic Solids*_Cambridge University Press, Cambridge, 2003_, H. Kronmüller, K.-D. Durst, 和M. Sagawa, *J. Magn. Mater.* 74, 291_1988)。造成烧结的磁体在室温下反转磁性的机制被发现是成核类型的。微结构对矫顽磁性H_{ci}的破坏效应,即,不对准的晶粒、磁耦合晶粒、磁扰动晶粒表面、以及在多面体晶粒的尖角和边缘处的大的局部退磁杂散场,被认为是响应于场反转而有助于畴成核的现象。

[0079] 这种类型的“核壳”结构最近已经由很多作者研究,他们提出利用较小的Dy添加来改善H_{ci}的优点。这些研究中的大部分使用从基于体Nd₂Fe₁₄B的磁体表面沿着晶界扩散Dy,以产生Dy晶粒表面加强的微结构。

[0080] Hitachi工艺(US8206516)通过从体磁体的表面的扩散产生重稀土的晶界加强。这是烧结后工艺,其发生在气相沉积系统中。从体磁体的表面的Dy扩散局部化于晶界,因为边界的扩散系数比在体中高很多个量级。GM提出的工艺被设计为提供了Hitachi工艺的一种替代方案,作为更经济的方法,在Nd₂Fe₁₄B基磁材料的晶界上提高Dy含量。本方法在经济上更优,因为Dy在晶界上的分布是通过内部Dy源在粉末冶金和热成形处理期间发生,而不是在热处理之后通过外部Dy源(Hitachi),并且不需要多个额外设备或较长的额外工艺步骤。

[0081] 晶界加强方法的效率由Hitachi专利(US8206516)支持。Hitachi的研究者首先证明了使用气相沉积/晶界扩散工艺增加矫顽磁性,然后展示了矫顽磁性如何随着有效厚度被除去而降低。作者提出这指示了在900℃下240分钟的Dy穿透深度,达到晶界Dy成分和因此在高达大约1mm深度的磁行为。Hitachi工艺在能够处理的磁体厚度方面有局限性。

[0082] 本文的发明涉及一种系统的方法,其发展了热压(在磁场下用于晶粒对准)和/或

热压加热变形制造工艺(模锻),其调节($RE_2TM_{14}B$)-(富稀土共晶)系统中的微结构和对热动力学、动力学和磁现象的化学计量依赖,以大大地降低磁体中对于Dy和其它HRE的需求,该磁体在较高的温度下保持甚至提高了它们较大的 H_c 和 B_r 。共晶相将体材料中的各个 $Nd_2Fe_{14}B$ 晶粒磁性地隔离,导致 H_c 显著增加。

[0083] 本发明的一个方面是一种制造用于永磁体的磁材料的方法。在一个实施例中,方法包括将包含Nd、Fe和B的第一材料(可以是核粉末的形式)与包含金属合金形式的Dy或Tb中的一个或两个的第二材料(可以是表面粉末或片的形式)组合,使得形成涂覆的、类复合物材料,带有组成第二材料的Dy或Tb的不均一(或不均匀)分布,这确保Dy、Tb或两者的表面浓度超过它们的体浓度,同时保持较低的整体使用。在具体实施例中,在晶粒表面的Dy和/或Tb浓度远高于体中;在具体实施例中,在晶粒表面,Dy和/或Tb浓度是大约10至大约50重量百分比,或者在晶粒表面比体中高得多。在本文的具体实施例中,本文所述的方法所得到的终端产品能够具有这一方面。

[0084] 在本文的上下文中,不均匀或不均一分布指的是第二材料分布或集中在第一材料的离散位置处,诸如在界面或晶界或表面上的其它位置处,在组成第一材料的粒子内很少或没有(诸如通过扩散、化学组合等)。

[0085] 在一种形式中,包含Dy或Tb的合金可以处于小粉末形式,而在另一形式中,材料可以是大的片基形式,与这些尺寸差异相关联的细节在以下通过更长篇幅来论述。不管形式如何,它们可以用于掺和、混合以及机械涂覆来产生类复合物材料。可以通过使用原子化(熔融金属遇到高压惰性气体(诸如氩)以形成粒子)或通过流铸接着氢破碎和脱氢来制造粉末和片状粉末。

[0086] 重要的是,根据本发明制造的磁材料可以被热压,以便保持低的扩散,由此在晶界区域(本文也称为晶界表面)周围保留Dy和Tb中的一个或两个的期望的不均一含量。在一个形式中,磁材料和/或永磁体具有Dy、Tb或两者的大约10wt%和大约50wt%之间的晶界表面浓度。

[0087] 本文所述的实施例采用温度、压力、时间、空间构造和化学方面的改变,以便改变Dy和Tb、以及各种其它元素,诸如Nd, Pr, 镓(Ga), B, Fe, Co, Al, Cu等的扩散或相关的迁移性质。在一个特定的形式中,可以通过调节这些参数来实现涂覆材料在被涂覆的材料周围的机械包封,其中,可以利用更高能级来实现更完全的包封,但是包封不需要是完全的来证明改善的性能。在此情况下,由于以上元素中的一种或多种在较高温度和压力下的扩散,在某些情形下局部包封也是可以接受的。通过控制研磨和混合动力学,可以形成新的和不同的材料相。在工艺期间单独地添加一些元素(单独的形式或作为二元或三元合金的一部分),可以发生其它的改进。这样的改进尤其帮助以诸如上述的不同元素含量来选择性地形成一个或多个新的相。这些相可以包括晶界周围的共晶相,带有以上所述的一种或多种不同元素,诸如富Nd和富Dy的三叉晶界相。这些相(从相图可见,这些相是带有多元素的最为共晶的相)可以在改善(即,提高)矫顽磁性(H_{cJ})或其它磁性质方面起到重要作用。从它们的形态来说,它们可以称为三(或多)叉晶界相,因为它们位于晶界周围,尤其在三个(或多个)晶粒相遇的叉区域周围。

[0088] 本文公开的实施例的第二方面涉及利用Dy或Tb中的至少一个的不均一扩散来制造Nd基永磁体的方法,其机械地研磨包含Nd-Fe-B的粉末基材料和包含Dy和Tb中的至少一

个的片基材料,使得粉末基材料基本上被涂覆一层片基材料。在研磨之后,片基材料的没有涂覆被涂覆的粉末基材料的额外部分可以通过筛去而除去,此后被涂覆的类复合物材料在用于粉末对准的磁场下形成为预先确定的形状。该成形的部分在较高的温度下被压制,使得该部分形成为:用于涂覆下面的粉末基材料的片基材料可以保留在材料中,并且以非均匀的方式分布。在一种形式中,这种非均匀性是通过下面的粉末基材料的晶界处的选择聚集或者通过热处理期间的共晶相形成而实现的。

[0089] 本文所述实施例的第三方面涉及利用Dy或Tb中的至少一个的不均一扩散来制造Nd基永磁体的方法。该方法包括机械地研磨包含Nd-Fe-B的第一粉末基材料和包含Dy和Tb中的至少一个的第二粉末基材料,使得第一粉末基材料被充分混合并且涂覆一层第二粉末基材料。该涂覆的粉末然后在磁场下被形成为预先确定的形状,然后被加热和压制,使得磁体部分被形成为第二粉末基材料以非均匀方式分布在第一粉末基材料的表面上。这种非均匀性可以通过元素(尤其是Dy、Tb和/或其它RE元素)的晶界处的选择聚集或者通过共晶相形成而实现。本文所生产的磁材料或永磁体的实施例可以是小的或大的,在具体实施例中,磁材料或永磁体的尺寸可以是一立方英寸的几分之一或者一立方英寸,或者甚至尺寸是若干立方英寸或者尺寸是大约一或几立方英尺,在具体实施例中,磁材料或永磁体可以放置在电机中,并且可以放置在转子或定子中,在具体实施例中,形状可以是例如圆的或矩形的或盘形,或者是本领域已知的其它材料形状。

[0090] 使用本工艺制造的磁体比使用传统方法制造的磁体使用少得多的Dy或Tb,同时获得类似的磁性质。在本工艺中,Dy或Tb涂覆的Nd-Fe-B粉末用于制造磁体,其在磁体中产生Dy或Tb的不均匀分布,这能够使用具有微探针的扫描电子显微镜看到和测量。这使本工艺对于类似的磁性质能够使用少得多的Dy或Tb。例如,Dy和/或Tb的量相比于传统工艺能够减少约20%或以上,或约30%或以上,或约40%或以上,或约50%或以上,或约60%或以上,或约70%或以上,或约80%或以上,或约90%或以上。对于非均匀分布,我们指的是Dy和/或Tb在粉末粒子的界面处分布或集中,在粒子内很少或没有。

[0091] 使用这些方法,Dy和/或Tb涂层厚度能够从约1微米到约100微米,例如,约2至约100微米,或约5至约90微米,或约5至约80微米,或从约5至约70微米,或从约5至约60微米,或从约10至约50微米。

[0092] 粉末涂覆工艺允许平均Dy和/或Tb浓度降低和在磁体中改变Dy和/或Tb的分布。相比于具有类似的高磁性质的传统磁体的约6-9wt%来说,磁体的平均Dy和/或Tb浓度的范围可为约0.3至约6wt%,或约0.3至约5wt%,或约0.3至约4wt%,或约0.3至约3wt%。涂覆工艺产生粉末粒子,其具有高达约5至约80wt%或以上的Dy和/或Tb表面浓度,和低的Dy和/或Tb体浓度(即,粒子内)。如果需要的话,Dy和/或Tb可以有意地从粒子表面添加或部分扩散到粉末粒子中。然而,粒子内的Dy和/或Tb的体浓度小于Dy和/或Tb的表面浓度。涂覆工艺被引入到用于粉末冶金工艺的当前制备中作为额外步骤。

[0093] 按照需要,可以使用Dy或Tb或两者。如果包括Tb,那么不需要那么多Dy。例如,Dy和Tb的组合可能低于约6wt%。Tb能够比Dy更有效地改善磁性质。然而,这应该相对于显著更高的Tb的成本进行平衡。如果需要,可以使用高达大约10的Dy与Tb之比。

[0094] Dy或Tb浓度分布特征可以被磁体的各种热处理(特别是退火安排)控制。更长的时间或更高的温度可以使分布更宽和粒子表面处的较少集中。

[0095] 在各种实施例中,可以使用以下步骤的一些或全部:磁体制造工艺可包括:1)熔融和带铸造,2)氢破碎(氢化物和去氢化物),3)磨碎(用氮),4)混合合金粉末以调节化学成分和可选筛去,5)利用富Dy和/或Tb粉末涂覆粉末,和6)可选筛去。在特定实施例中,筛去可以包括一个或多个尺寸的筛网,以移除额外的粉末。接下来,可以在磁场和热压工艺下形成并且加工为磁体块。最后,磁体可以进行表面处理(例如,磷化处理,无电极Ni镀,环氧涂覆等)。

[0096] 上述三种涂覆方法将更详细地讨论。

[0097] 机械合金化是固态粉末加工技术,其涉及在高速球磨机中粉末粒子的重复焊接,破裂,重焊。其能够用于由混合的元素或预合金化的粉末开始合成各种平衡和非平衡合金相。合成的非平衡相包括过饱和固溶体,亚稳态晶体和准晶相,纳米结构和非晶合金。

[0098] 机械合金化使用高能研磨机来有利于冷焊所需要的塑性变形,并减少工艺时间。其允许使用元素和中间合金粉末的混合物。中间合金粉末的使用减小了元素的活性,因为已知合金或化合物的活性可能在数量级上比纯金属要小。机械合金化消除了表面活性剂的使用,表面活性剂会产生精细引火粉末并污染粉末。其依赖于焊接和破裂之间的不变相互作用,以产生具有精细内部结构的粉末,通常产生很细的粉末,但其具有的总粒子尺寸是比较粗的,并因此是稳定的。

[0099] 机械合金化工艺开始于以所需比例混合粉末。粉末混合物与研磨介质(例如钢珠)一起装载到球磨机中。然后粉末混合物被研磨所需的时间长度。机械合金化工艺的重要部分是原材料、研磨、和工艺变量。参数包括研磨机类型,研磨容器,研磨速度(一般约50至约400rpm,典型地约250rpm),研磨时间(一般约0.5至约12小时),研磨介质(如硬化钢,不锈钢等)的类型、尺寸和尺寸分布,珠对粉末重量比(一般约1:1至高达约220:1,典型地约10:1),填充瓶的程度,研磨氛围(如真空,氮气或氩气),和研磨温度(一般大约室温至约250°C)。

[0100] 用于机械合金化的原材料能够具有大约1至大约200微米(μm)的范围内的粒子尺寸。除了应小于研磨球的尺寸以外,粉末粒子尺寸不重要,因为粉末粒子尺寸随时间指数下降,并且仅在研磨几分钟之后达到几微米。原粉末能够为纯金属、中间合金、或预合金化粉末。

[0101] 不同类型的高速研磨设备能够用于产生机械合金化粉末。它们在其研磨能力、效率,以及用于冷却、加热等的额外布置上不同。传统的球磨机10包括旋转筒15,其部分填充小钢珠20,如图1所示。随着筒15旋转,珠20落到被研磨的金属粉末上。例如,研磨罐或容器可使用不锈钢或内侧涂覆有铝、碳化硅、氮化硅等的不锈钢。球磨机10包括旋转叶轮25。冷却剂从入口30流过筒15的套管到达出口35以在研磨期间控制粉末的温度。

[0102] 另一种方法涉及使用物理气相沉积(PVD)利用Dy或Tb金属涂覆Nd-Fe-B基粉末。在图2-3中示出了使用基于火花腐蚀和溅射的粒子枪的PVD方法,但是如果需要的话,可以使用其他的PVD工艺。“基底”能够位于底部。基底基本上是容器,其包含将被涂覆的Nd-Fe-B粉末。如果需要的话,可以在容器中具有混合器(未显示)以搅拌粉末,从而确保粉末的均匀涂覆。

[0103] 图2示出了火花腐蚀PVD工艺。具有固定的电极保持器100和可移动的电极保持器105。固定的电极保持器100连接到电源(未显示)。可移动的电极保持器105连接到电源和机械振荡器(未显示)。固定的电极保持器100和可移动的电极保持器105具有电极110。载气入

口115引入载气。处理气体入口120将处理气体引入到载气中,结构130显示为邻近气体入口120。涂覆材料被引导到基底135。

[0104] 溅射PVD涂覆工艺如图3所示。在顶部上具有两个磁控管溅射源150,朝向底部上的旋转基底台155。在溅射中,由于等离子体中的高能粒子(如氮离子)的冲击,原子从目标材料(Dy和/或Tb或其合金)的表面射出。射出的原子在基底表面上凝结以产生薄膜。

[0105] 第三涂覆方法涉及利用与溶剂混合的Dy或Tb金属和/或合金的非常精细的金属粉末涂覆Nd-Fe-B基粉末。通过利用漩涡加速器来加速空气或惰性气体流来建立高速射流(约30至约60英尺/秒)。通过调节空气/气体流的流率和压力,在湍流通常会发生处可以雷诺数建立层流模式。气体被引导到“涂覆管”。例如,漩涡加速器可从GEA Process Engineering Inc., of Columbia, MD 21045获得。

[0106] 如图4所示,将在“向下流动床”200的区域中涂覆的粉末的容器围绕涂覆管205并且保持由从底部进入粉末床的低速气流210轻松地充气。在这个区域中具有低体积流量。在润湿和接触区225之下的入口流体化板220和涂覆管205的底部之间的间隙215允许粉末暴露于高速气流。粉末的粒子在此界面被拾取并被气流加速。

[0107] 包含Dy或Tb金属或合金的涂层的精细喷雾230通过喷雾喷嘴235被引入高速气流的底部。涂覆喷雾230运动得比固体粒子更快,所以发生接触并且沉积涂层。

[0108] 边界层效应造成从管中心处的高气体速度到壁处的零的速度梯度。这种梯度使粉末被气流翻滚,使得所有粒子表面暴露于涂覆喷雾。一旦涂层被施加,涂覆的粒子在涂覆管上向上行进。粒子速度总是低于气体的速度,所以在粒子表面上总是有气体运动。这种气体运动蒸发溶剂并且在干燥区240中干燥涂层。在粒子到达涂覆管205的端部的时候,粒子基本上是干燥的。

[0109] 在管的端部,粒子从高速流脱离并落回到保持区域(未显示)。

[0110] 图5显示了粉末涂覆的两种方法。一个方法245以图5的左上部示出的核壳结构来涂覆,其中,壳正被富含Dy的材料涂覆,并且内部部分富含Nd/Fe/B。被涂覆的核的示例直径以255示出。可使用一方法来实现涂覆,在该方法中,使用的粒子是非常不同的尺寸,导致在核周围基本上完全涂覆,在特定示例中,存在大约核的100%的涂覆,如图5左侧所示,在其它形式中,存在核的大约75%至大约100%涂覆,或者核的大约50%至75%的涂覆。在图5的右侧,混合粉末方法250被示出,其中,粒子是不同的尺寸,使得发生局部涂覆,在具体实施例中,涂覆从大约0至大约50%,在其他形式中,从大约0至大约25%或从大约25%至大约50%。大的圆圈和小的圆圈分别表示大的粉末和小的粉末。小的粉末富含Dy,大的粉末富含Nd/Fe/B。核壳方法和混合粉末方法都可以用在本文所述的实施例中。核壳方法导致在每个Nd/Fe/B粒子周围更为均匀地分布富含Dy的材料。在粒子的示例定位中从一个小粒子到另一个小粒子的距离260在附图5的右侧以箭头显示。

[0111] 图6示出了来自图5的右侧图像的放大视图的示意图。显示了具有很多晶粒的粉末的一个粒子。粒子是Nd-Fe-B粒子270,富含Dy的粉末265显示为在其周围(富含重稀土的粉末在外侧)。晶粒显示为在Nd-Fe-B粒子内部。如果被加热,则Dy通过固体扩散沿着晶粒和穿过晶粒分布。在具体实施例中,粉末265是Dy或Tb或者它们两者。

[0112] 图7显示了以下相:三叉晶界相,软磁相,硬磁相,和晶界相。图7显示了晶界的大复杂性。显示了软磁相(α -Fe)275,硬磁相($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$)280,边缘285,Dy粒子290,晶界相(富含

Nd)295,和三甲晶界相(富含Nd)300。使用采用两种粉末的热压方法,由于所使用的压力,核温度可以是较低的,其还促进Dy的非均匀分布。在根据本文所述方法进一步加热和进一步压制之下,Dy的致密区域(富含Dy的层)将消散,以获得Dy粒子的更均匀分布,使得可以使用较少的Dy来获得相同的结果。利用热压,Dy沿着晶界分布,理想地,晶粒内的Dy被最小化。

[0113] 热压和热处理工艺的示例

[0114] 热压方法可以包括:使用带有期望成分的粉末混合物;在磁场下(大约1至大约2.5特斯拉(T)),在真空(大约10至大约2托)或在惰性氛围(Ar或N₂)下,在有形状的模具中形成磁体部分;将该部分缓慢地从室温加热到热压温度,维持大约500°C至大约850°C的温度达到大约0.5至大约2小时。在具体实施例中,从在室温加热开始到在大约500°C至大约850°C的范围内加热结束的时间,在其它具体实施例中,到达大约500°C至大约850°C的范围的时间需要1.5-2小时(其中,可以执行大约0.5至大约2小时的额外加热)。在具体实施例中,用于热压的时间可以从大约30分钟至大约40分钟,或者大约50分钟至大约1小时,或者从大约1小时至大约2小时。在大约30至大约90兆帕(MPa)(典型地大约50至大约80MPa)在模中热压大约3至大约20分钟,在具体实施例中,可以从大约5至大约10分钟。在具体实施例中,该部分的密度实现了超过85%的理论密度(理论密度:7.6g/cm³)。在真空(大约10至大约2托)或在惰性氛围(Ar或N₂)下。缓慢冷却1至5小时,或者继续时效化热处理。时效化热处理温度:大约600°C至大约1000°C(时间例如,大约0.5至大约8小时)。冷却可以在时效化步骤之前执行,或者时效化可以在热压之后直接执行,在两者之间没有冷却。在真空(大约10至大约2托)或在惰性氛围(Ar或N₂)下。这可能涉及各种温度和时间长度下的多个步骤,以便最大化晶界扩散和最小化Dy或其它HRE的体扩散。

[0115] 对于经历热变形或模锻的部分来说,在部件形成期间的磁场不是必要的,因为在热变形或模锻期间实现了粒子对准。热变形温度:从大约550°C至大约900°C,在特定实施例中,范围从大约700°C至大约850°C。

[0116] 一个示例:掺和的Nd₂Fe₁₄B+Dy₂Fe₁₄B带的真空热压/模锻显示了非均匀的Dy分别(掺和的Dy_{2.37}Fe+Nd_{2.7}Fe₁₄B粉末)。掺和粉末的该热压方法与热压/模锻工艺是平行的。

[0117] 在具体实施例中,Nd₂Fe₁₄B基磁材料的每个粒子可以包含其它元素,诸如Co、Ga、Cu、Pr、Dy、Tb等。粒子被Dy和/或Tb加强的粒子所围绕,诸如Dy-Fe、Dy-Tb-Fe、Dy-Nd-Fe-B、Dy-Tb-Nd-Pr-Fe-Co-Ga-B等。HRE加强的粒子可以机械混合并且以Nd₂Fe₁₄B基粒子研磨,或者以PVD、CVD或其它方法(核壳)涂覆。通过加热以及压制来实现进一步的固结,其提高了晶界扩散(DB),带有有限的体扩散(D)。

[0118] 核壳方法将需要单独的Dy涂覆的Nd₂Fe₁₄B粉末,而混合粉末方法将可能使用机械混合的粉末。在每个情况下,在富含Dy的区域之间产生特性长度L。在控制Dy的显著晶粒表面加强方面,该扩散长度以及D和DB非常重要。

[0119] Nd-Fe-B永磁体可以使用热压加时效化热处理工艺来制造,其涉及制造具有期望化学成分的粉末。典型的工艺包括在用于粉末对准的磁场下称量和压制以及时效化。具体而言,粉末在设有磁化装置的第一压制机中部分地被压实并且磁对准。然后其转移到第二压制机,在此处其在高负荷下被加热和压制。或者,如此形成的部分可以被进一步压制以形成带有对准的晶粒结构的特定形状,尽管在此情况下在磁场下成形不是必要的。

[0120] 模锻示例

[0121] 在另一示例中,模锻被用于形成磁体。在非限制性模锻方法中,粉末变形大约20%至大约80%,在具体实施例中,变形从大约40%至大约80%,在具体实施例中,变形从大约50%至大约60%或从大约60%至大约70%,或从大约70%至大约80%。在通常的热压中,变形最多10%,通常较小,诸如2-3%。在模锻方法的具体示例中,使用高变形工艺,使得在压制之前,粉末不需要在磁场中预先对准。当这种大的变形发生时(大约20%至大约80%),晶粒磁对准,如同其已经处于磁场之下。因此,该方法提供了令人惊奇的优点。在具体实施例中,粉末被缓慢地压在一起,以形成诸如圆柱的形状,然后该圆柱被加热并压制,使得圆柱变得更平。形状可以改变,并且晶粒重新对准。

[0122] 应当指出,类似“优选地”、“常常”和“通常”的术语在这里并不用于限制所要求保护的本发明的范围或者并不用于暗示某些特征对于所要求保护的本发明的结构或功能是关键、基本的或至关重要的。而是,这些术语仅旨在强调在本发明的具体实施例中可以使用也可以不使用的可选或附加的特征。

[0123] 为了描述并限定本发明的目的,应当指出术语“装置”在此用于表示构件的组合和单独的构件,而不管构件是否与其它构件组合。例如,根据本发明的“装置”可以包括电化学转化组件或燃料电池、包括根据本发明的电化学转化组件的车辆等等。

[0124] 为了描述并限定本发明的目的,应当指出术语“基本上”在此用于表示可归因于任何定量比较、值、测量或其它表示的不确定性的固有程度。术语“基本上”在此还用于表示在不引起所述主题的基本功能的改变的情况下定量表示可以与表述的引用不同的程度。

[0125] 已经详细地并参照本发明的特定实施例描述了本发明,但将显而易见的是,在不脱离在所附权利要求书限定的本发明的范围的基础上,可以做出修改和改变。更具体地说,虽然这里将本发明的一些方面标识为优选的或特别有利的,但应当预想到,本发明未必局限于本发明的这些优选方面。

[0126] 在具体实施例中,一个或多个方法或者磁材料或永磁体可包括或可以由以下中的一个或多个制成或者可以包括以下的一个或多个:从大约1至大约2.5特斯拉(T)的磁场;加热磁材料包括加热磁材料并且将温度保持在从大约500°C至大约850°C的第二范围达到大约0.5至大约2小时;真空包括大约10至大约2托;惰性氛围可包括Ar或N₂;从大约30至大约90兆帕(MPa)的热压;从大约50至大约80兆帕(MPa)的热压;从大约1至大约5小时的冷却;从大约5%至大约80%镉的粉末材料;片状的粉末;在形成磁材料之前,通过筛去而除去没有涂覆的片状的粉末;从大约5°C至大约35°C冷却;在热压之后并且在冷却之前时效化热处理,时效化热处理包括从大约550°C至大约1000°C之下加热达到大约0.5至大约8小时,在大约10至大约2托的真空中,在包含Ar或N₂的惰性氛围下;方法可包括,在将第一材料与第二材料组合之后,第二材料形成厚度为大约1至大约100微米的层;将第一材料与第二材料组合,第二材料形成厚度为大约10至大约50微米的层;第二加热可以从大约700°C至大约850°C或从大约650°C至大约750°C;和/或方法可包括在热压固体材料之后并且在使固体材料变形之前,在真空中在惰性氛围下冷却固体材料达到大约1至大约5小时。

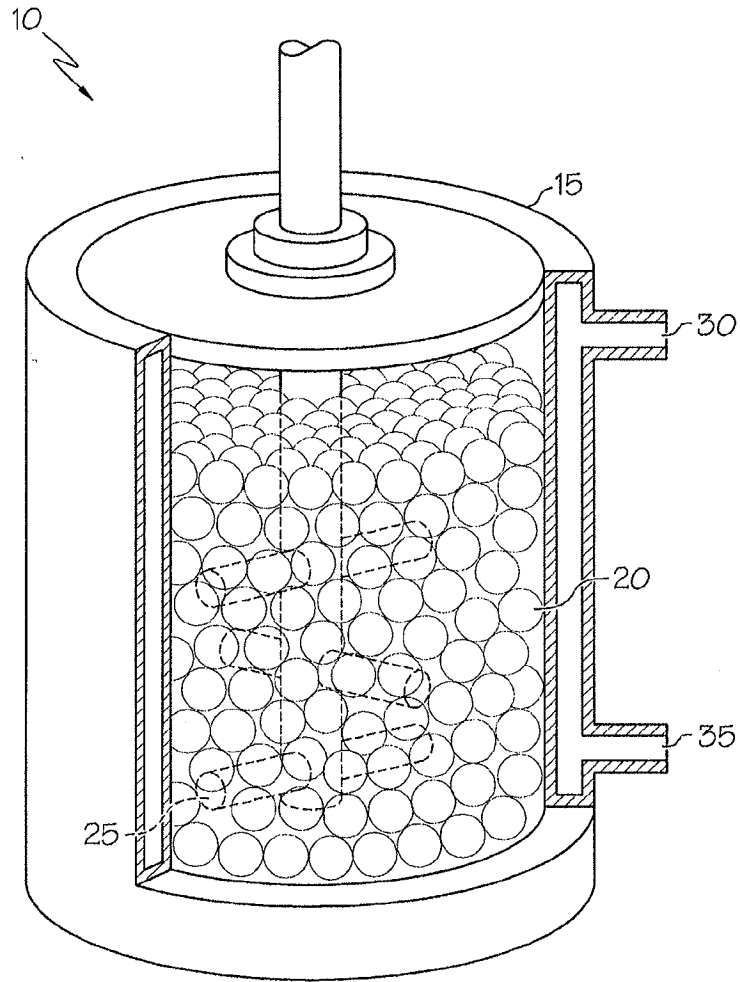


图 1

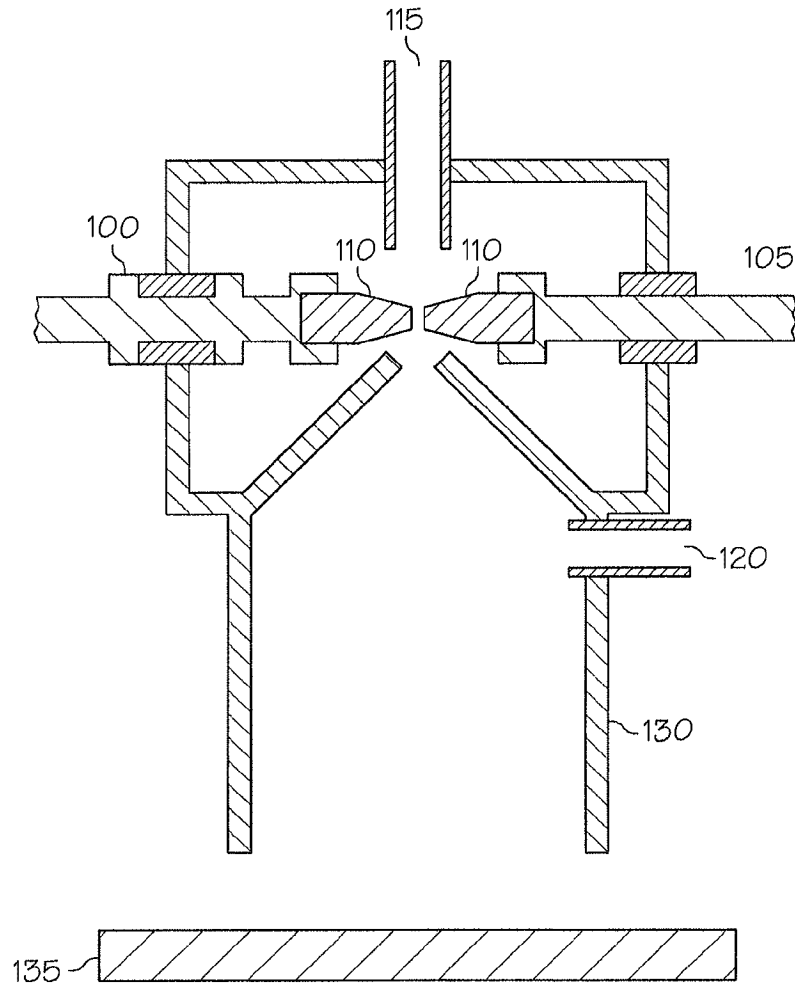


图 2

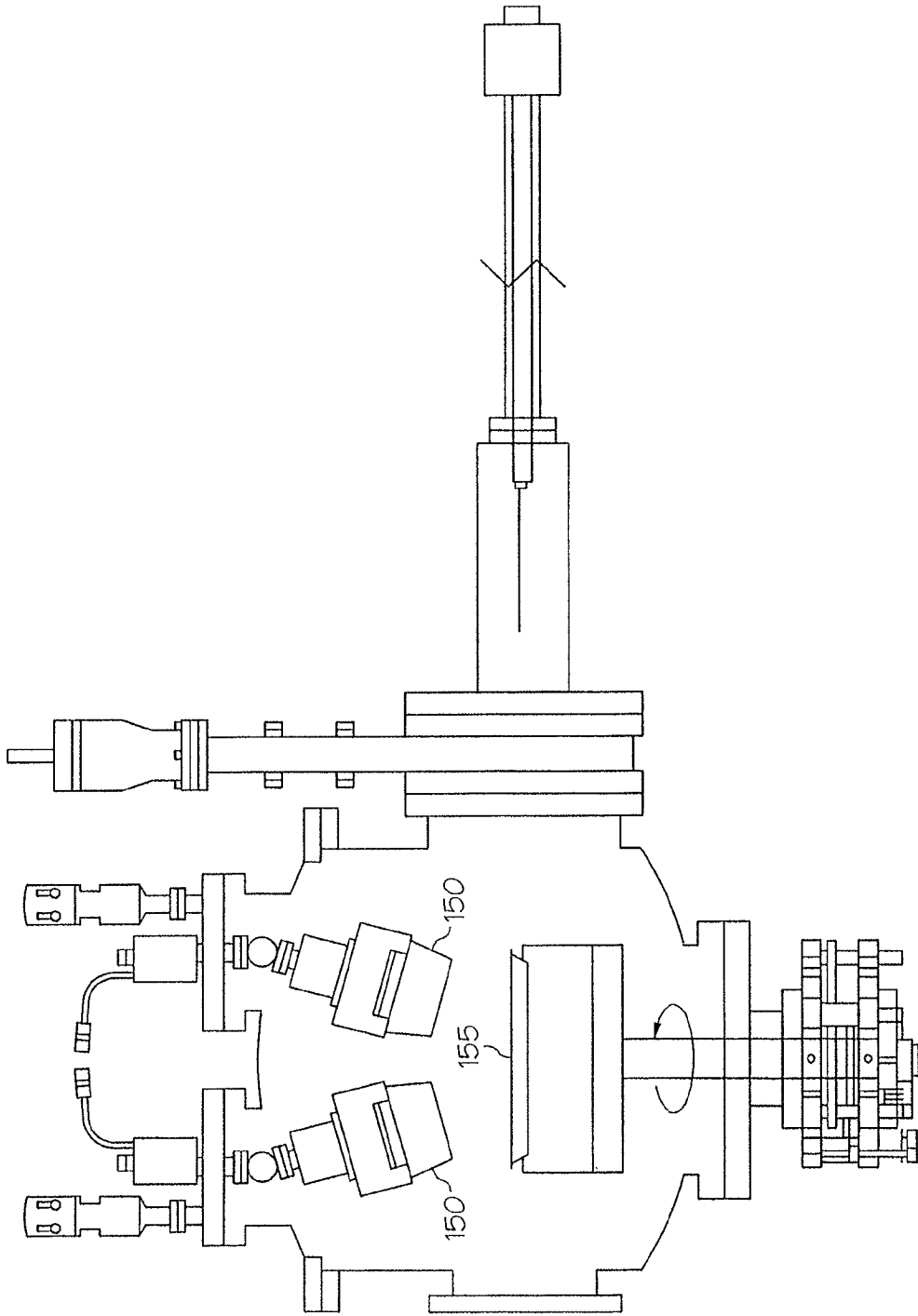


图 3

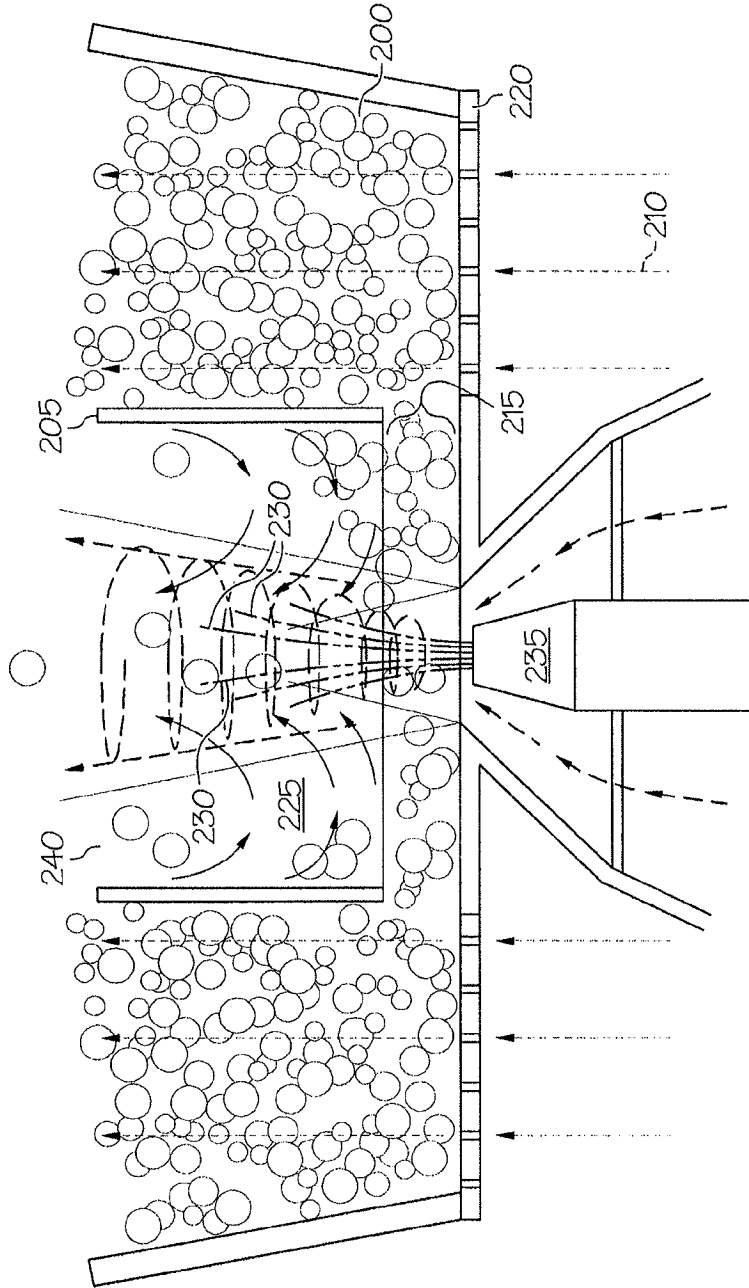
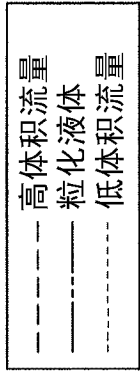


图 4

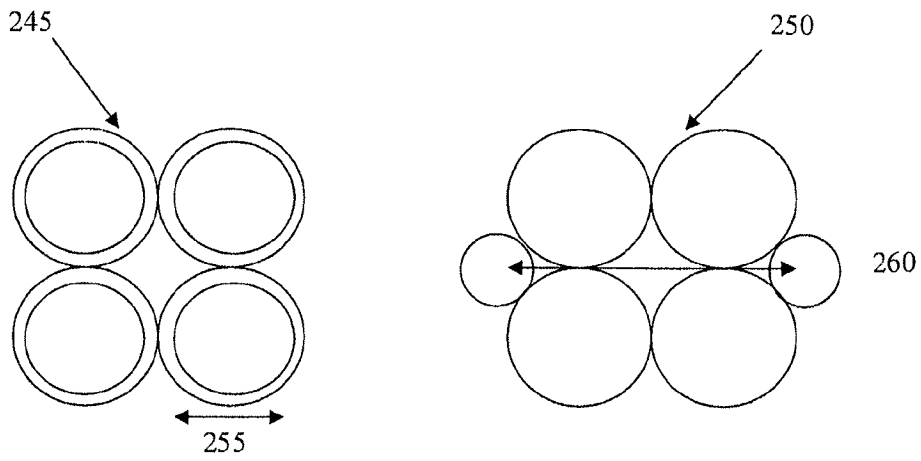


图 5

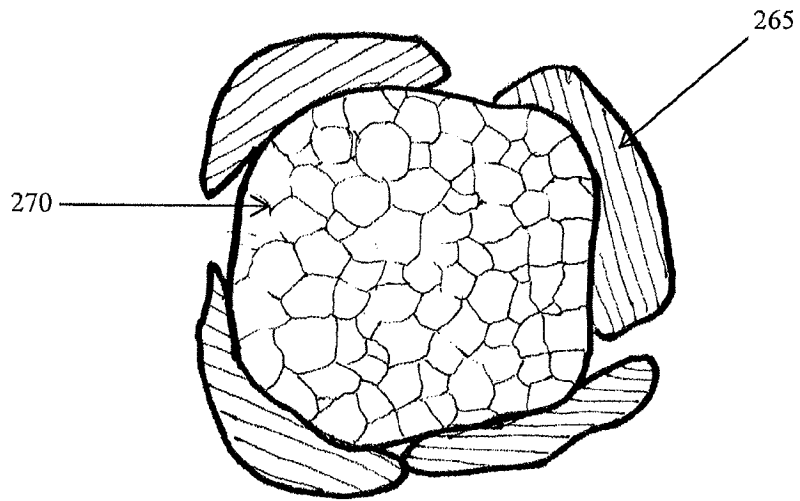


图 6

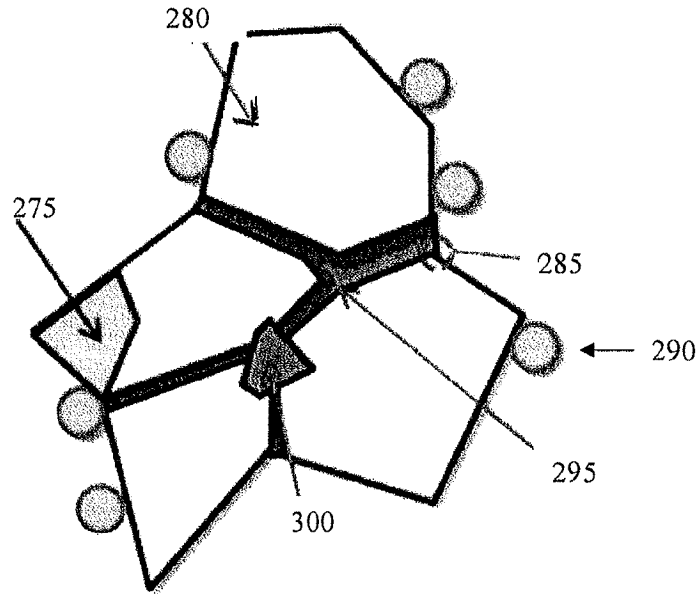


图 7