



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114231859 A

(43) 申请公布日 2022.03.25

(21) 申请号 202111572566.8

H01F 1/153 (2006.01)

(22) 申请日 2021.12.21

(66) 本国优先权数据

202110055359.9 2021.01.15 CN

(71) 申请人 武汉科技大学

地址 430081 湖北省武汉市青山区和平大道947号武汉科技大学

(72) 发明人 张华 刘涛 李杨 倪红卫

(74) 专利代理机构 武汉卓越志诚知识产权代理  
事务所(特殊普通合伙)

42266

代理人 董梦娟

(51) Int. Cl.

G22C 45/02 (2006.01)

G21D 9/52 (2006.01)

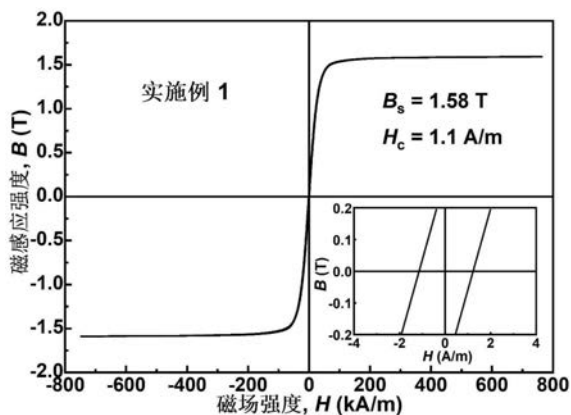
权利要求书2页 说明书7页 附图4页

(54) 发明名称

FeSiB(C) 非晶软磁合金及其制备方法

(57) 摘要

本发明提供了一种FeSiB(C) 非晶软磁合金及其制备方法。该制备方法以铁矿石或铁矿石与硼砂的混合物作为反应原料,采用碳基还原或氢基还原的方式对反应原料进行还原熔炼,将得到的还原产物熔融除渣并合金化,得到精炼钢液;再采用单辊旋淬法快速冷却精炼钢液,得到FeSiB(C) 非晶合金带材;经热处理后,得到FeSiB(C) 非晶软磁合金。通过上述方式,本发明能够有效利用冶金工艺与非晶合金成型工艺之间的协同作用,在精确控制冶炼条件的基础上有效简化工艺流程,控制杂质含量,并精确控制合金成分,大幅降低生产成本,在保证产品具有优异软磁性能的同时以低成本实现大规模高效生产,满足工业化生产与应用的需求。



1. 一种FeSiB(C)非晶软磁合金的制备方法,其特征在于,包括如下步骤:

S1、将铁矿石或铁矿石与硼砂的混合物作为反应原料,采用碳基还原或氢基还原的方式对所述反应原料进行还原熔炼,得到还原产物;

S2、对步骤S1得到的所述还原产物进行熔融除渣并合金化,得到精炼钢液;当步骤S1中所述反应原料为铁矿石时,所述熔融除渣后还加入了硼铁、硅铁进行所述合金化;

S3、采用单辊旋淬法对步骤S2得到的所述精炼钢液进行快速冷却,得到FeSiB(C)非晶带材;

S4、对步骤S3得到的所述FeSiB(C)非晶带材进行热处理,得到FeSiB(C)非晶软磁合金。

2. 根据权利要求1所述的FeSiB(C)非晶软磁合金的制备方法,其特征在于:

当步骤S1中采用所述碳基还原的方式进行还原熔炼时,在步骤S2中所述熔融除渣后还包括脱碳处理,在步骤S4中得到的为FeSiBC非晶软磁合金;

当步骤S1中采用所述氢基还原的方式进行还原熔炼时,若步骤S2中所述熔融除渣后未进行增碳处理,则步骤S4中得到的为FeSiB非晶软磁合金;若步骤S2中所述熔融除渣后进行了增碳处理,则步骤S4中得到的为FeSiBC非晶软磁合金。

3. 根据权利要求1所述的FeSiB(C)非晶软磁合金的制备方法,其特征在于:在步骤S1中,所述碳基还原具体包括如下步骤:

将所述反应原料粉碎后与还原剂煤粉或焦炭混匀,造团、干燥后放置于高温还原反应炉中,控制还原反应气氛为惰性气氛,还原温度为1000~1350℃,反应时间为10~60min,反应完成后,将得到的反应产物再破碎、磁选、熔分,得到的还原合金即为所述还原产物;

或者,将所述反应原料造球、干燥后置于高温还原反应炉中,按照预定的流量通入CO还原气体;控制还原反应温度为900~1300℃,反应完成后,将得到的反应产物再破碎、磁选、熔分,得到的还原合金即为所述还原产物。

4. 根据权利要求1所述的FeSiB(C)非晶软磁合金的制备方法,其特征在于:在步骤S1中,所述氢基还原具体包括如下步骤:

将所述反应原料造球、干燥后置于还原装置中,将氢基还原气体以预定速度通入还原反应装置内,控制所述还原反应装置内的温度为900~1300℃,反应完成后,将得到的反应产物再破碎、磁选、熔分,得到的还原合金即为所述还原产物;

或者,将所述反应原料制成粉状,与氢基还原气体经加热预处理后一同喷入闪速还原反应管道内,控制所述闪速还原反应管道内温度为900~1500℃,所述氢基还原气体和粉状的所述反应原料在所述闪速还原反应管道内下降的过程中完成闪速还原反应;所述闪速还原反应管道下部连通熔分装置,在1550~1700℃环境温度设置下,在所述熔分装置中收集得到还原合金,即为所述还原产物。

5. 根据权利要求1所述的FeSiB(C)非晶软磁合金的制备方法,其特征在于:在步骤S2中,所述合金化处理前还包括去除杂质处理,所述合金化的处理温度为1350~1600℃。

6. 根据权利要求1所述的FeSiB(C)非晶软磁合金的制备方法,其特征在于:在步骤S2中,所述精炼钢液的组成成分及其质量百分比包括: $86.8\% \leq \text{Fe} \leq 96.2\%$ 、 $0.8\% \leq \text{Si} \leq 7.5\%$ 、 $1.6 \leq \text{B} \leq 3.0\%$ 、 $\text{C} \leq 0.5\%$ 、 $\text{P} \leq 0.01\%$ 、 $\text{S} \leq 0.01\%$ 、 $\text{Mn} \leq 0.02\%$ 、 $\text{Ti} \leq 0.005\%$ 、 $\text{Al} \leq 0.015\%$ 。

7. 根据权利要求1~6中任一权利要求所述的FeSiB(C)非晶软磁合金的制备方法,其特

征在于:在步骤S3中,采用所述单辊旋转法时,设置铜辊线速度为20~60m/s,得到的所述FeSiB(C)非晶带材的厚度为15~50 $\mu$ m。

8.根据权利要求1~7中任一权利要求所述的FeSiB(C)非晶软磁合金的制备方法,其特征在于:在步骤S4中,所述热处理的方式为等温热处理,设置保温温度为240~420 $^{\circ}$ C,保温时间为10~180min。

9.一种FeSiB(C)非晶软磁合金,其特征在于:所述FeSiB(C)非晶软磁合金根据权利要求1~8中任一权利要求所述的制备方法制备得到;所述FeSiB(C)非晶软磁合金的化学式为 $Fe_aSi_bB_cC_dM_e$ ,其中,M代表微量元素Mn、P、S、Ti、Al中的一种或多种混合,下标a、b、c、d、e分别表示各组成成分的原子百分含量,且满足下述条件: $78 \leq a \leq 84$ 、 $2 \leq b \leq 9$ 、 $8 \leq c \leq 14$ 、 $0 \leq d \leq 2$ 、 $e \leq 0.3$ 、 $a+b+c+d+e=100$ 。

10.根据权利要求9所述的FeSiB(C)非晶软磁合金,其特征在于:所述FeSiB(C)非晶软磁合金的饱和磁感应强度 $\geq 1.55$ T,矫顽力 $\leq 3.2$ A/m,1KHz下有效磁导率 $\geq 8000$ 。

## FeSiB (C) 非晶软磁合金及其制备方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及非晶软磁材料制备技术领域,尤其涉及一种FeSiB(C)非晶软磁合金及其制备方法。

### 背景技术

[0002] 软磁材料作为具有低矫顽力、高磁导率、高饱和磁感应强度、低损耗、高稳定性的磁性材料,被广泛应用于各类电力设备和电子器件中。在各类软磁材料中,铁基非晶软磁合金在结构上具有短程有序而长程无序的特点,这种独特的无序结构使其不存在位错、晶界等缺陷,且具有较小的结构关联尺寸和很小的磁各向异性,从而表现出更低的矫顽力和更高的磁导率,并具有良好的机械性能和耐腐蚀性能,因而受到研究者的广泛关注,并相继开发出了Fe-B系、Fe-Si-B系、Fe-P-C系、Fe-Si-B-C系、Fe-Si-B-P系、Fe-Si-B-C-P系等一系列铁基非晶软磁合金。

[0003] 在各类铁基非晶软磁合金中,Fe-Si-B系和Fe-Si-B-C系非晶软磁合金以其优良的综合性能和易成型优势而被广泛应用。目前,FeSiB(C)非晶软磁合金的制备主要是根据成分配比选择相应的纯铁与铁硼、铁磷和铁碳等中间合金作为原料,经熔炼、成型后制得所需的合金带材。然而,这样的制备方法不仅具有较高的原料成本,其中间合金中含有的较多杂质还会影响非晶合金的形成,进而导致制得的软磁材料的成分及性能受限于原料的种类与纯度;并且,在熔炼过程中难以对熔炼的温度进行有效控制,容易出现熔炼温度不均匀的问题,影响产品性能。

[0004] 公开号为CN111001767A的专利提供了一种高饱和磁感应强度铁基非晶软磁合金及其制备方法,该方法利用铁矿石经高炉炼铁、转炉吹炼或利用废钢经电炉熔炼得到初炼钢液;再对初炼钢液进行炉外精炼,进一步脱氧、脱硫、去除夹杂物,控制残余元素的含量,并进行合金成分微调,得到精炼钢液;然后利用单辊旋淬技术将精炼钢液快速冷却得到非晶带材,经热处理后得到具有高饱和磁感应强度的铁基非晶软磁合金。然而,该专利中采用的高炉炼铁、转炉吹炼或电炉熔炼的方式单次产量过高,不符合软磁产品的实际需求;且这些冶炼方式对原料的成分有非常高的要求,如P、S、Cu、碱金属等高炉炼铁过程的有害元素的含量都需要被严格控制,不仅无法充分利用铁矿石种类和冶炼方式的多样性,成分设计单一,还需要在制备过程中对钢液进行复杂的脱硫、脱氧处理,在出钢过程中再添加含量较高的硅铁、硼铁、磷铁等高成本原料,整体存在操作工序复杂、操作时间长且生产成本和生产能耗大等问题。

[0005] 有鉴于此,有必要设计一种改进的FeSiB(C)非晶软磁合金的制备方法,以解决上述问题。

### 发明内容

[0006] 针对上述现有技术的缺陷,本发明的目的在于提供一种FeSiB(C)非晶软磁合金及其制备方法。通过采用碳基还原或氢基还原的方式对反应原料进行还原熔炼,并通过熔融

除渣除去精炼钢液中的杂质,再利用合金化有效控制精炼钢液的成分,经单辊旋淬和热处理后制备FeSiB(C)非晶软磁合金,从而有效利用冶金工艺与非晶合金成型工艺之间的协同作用,在精确控制冶炼条件及合金成分的基础上有效简化工艺流程,并大幅降低生产成本,在保证产品具有优异软磁性能的同时以较低的成本实现大规模高效生产,以满足工业化生产与应用的需求。

[0007] 为实现上述目的,本发明提供了一种FeSiB(C)非晶软磁合金的制备方法,包括如下步骤:

[0008] S1、将铁矿石或铁矿石与硼砂的混合物作为反应原料,采用碳基还原或氢基还原的方式对所述反应原料进行还原熔炼,得到还原产物;

[0009] S2、对步骤S1得到的所述还原产物进行熔融除渣并合金化,得到精炼钢液;当步骤S1中所述反应原料为铁矿石时,所述熔融除渣后还加入了硼铁、硅铁进行所述合金化;

[0010] S3、采用单辊旋淬法对步骤S2得到的所述精炼钢液进行快速冷却,得到FeSiB(C)非晶带材;

[0011] S4、对步骤S3得到的所述FeSiB(C)非晶带材进行热处理,得到FeSiB(C)非晶软磁合金。

[0012] 作为本发明的进一步改进,当步骤S1中采用所述碳基还原的方式进行还原熔炼时,在步骤S2中所述熔融除渣后还包括脱碳处理,在步骤S4中得到的为FeSiBC非晶软磁合金;

[0013] 当步骤S1中采用所述氢基还原的方式进行还原熔炼时,若步骤S2中所述熔融除渣后未进行增碳处理,则步骤S4中得到的为FeSiB非晶软磁合金;若步骤S2中所述熔融除渣后进行了增碳处理,则步骤S4中得到的为FeSiBC非晶软磁合金。

[0014] 作为本发明的进一步改进,在步骤S1中,所述碳基还原具体包括如下步骤:

[0015] 将所述反应原料粉碎后与还原剂煤粉或焦炭混匀,造团、干燥后放置于高温还原反应炉中,控制还原反应气氛为惰性气氛,还原温度为1000~1350℃,反应时间为10~60min,反应完成后,将得到的反应产物再破碎、磁选、熔分,得到的还原合金即为所述还原产物;

[0016] 或者,将所述反应原料造球、干燥后置于高温还原反应炉中,按照预定的流量通入CO还原气体;控制还原反应温度为900~1300℃,反应完成后,将得到的反应产物再破碎、磁选、熔分,得到的还原合金即为所述还原产物。

[0017] 作为本发明的进一步改进,在步骤S1中,所述氢基还原具体包括如下步骤:

[0018] 将所述反应原料造球、干燥后置于还原装置中,将氢基还原气体以预定速度通入还原反应装置内,控制所述还原反应装置内的温度为900~1300℃,反应完成后,将得到的反应产物再破碎、磁选、熔分,得到的还原合金即为所述还原产物;

[0019] 或者,将所述反应原料制成粉状,与氢基还原气体经加热预处理后一同喷入闪速还原反应管道内,控制所述闪速还原反应管道内温度为900~1500℃,所述氢基还原气体和粉状的所述反应原料在所述闪速还原反应管道内下降的过程中完成闪速还原反应;所述闪速还原反应管道下部连通熔分装置,在1550~1700℃环境温度设置下,在所述熔分装置中收集得到还原合金,即为所述还原产物。

[0020] 作为本发明的进一步改进,在步骤S2中,所述合金化处理前还包括去除杂质处理,

所述合金化的处理温度为1350~1600℃。

[0021] 作为本发明的进一步改进,在步骤S2中,所述精炼钢液的组成成分及其质量百分比包括:86.8%≤Fe≤96.2%、0.8%≤Si≤7.5%、1.6≤B≤3.0%、C≤0.5%、P≤0.01%、S≤0.01%、Mn≤0.02%、Ti≤0.005%、Al≤0.015%。

[0022] 作为本发明的进一步改进,在步骤S3中,采用所述单辊旋淬法时,设置铜辊线速度为20~60m/s,得到的所述FeSiB(C)非晶带材的厚度为15~50μm。

[0023] 作为本发明的进一步改进,在步骤S4中,所述热处理的方式为等温热处理,设置保温温度为240~420℃,保温时间为10~180min。

[0024] 为实现上述目的,本发明还提供了一种根据上述制备方法制备得到的FeSiB(C)非晶软磁合金;所述FeSiB(C)非晶软磁合金的化学式为 $Fe_aSi_bB_cC_dM_e$ ,其中,其中,M代表微量元素Mn、P、S、Ti、Al中的一种或多种混合,下标a、b、c、d、e分别表示各组成成分的原子百分含量,且满足下述条件:78≤a≤84、2≤b≤9、8≤c≤14、0≤d≤2、e≤0.3、a+b+c+d+e=100。

[0025] 作为本发明的进一步改进,所述FeSiB(C)非晶软磁合金的饱和磁感应强度≥1.55T,矫顽力≤3.2A/m,1KHz下有效磁导率≥8000。

[0026] 本发明的有益效果是:

[0027] (1) 本发明提供的FeSiB(C)非晶软磁合金的制备方法根据非晶产品的成分特征,选择铁矿石或铁矿石与硼砂的混合物作为反应原料,采用碳基还原或氢基还原的方式对反应原料进行还原熔炼,并通过熔融除渣除去精炼钢液中的杂质,利用微合金化有效控制精炼钢液的成分。基于此,FeSiB(C)非晶软磁合金的制备过程不需要进行脱磷、脱氧等复杂的除杂过程,还能够保证获得成分可控的精炼钢液,不仅简化了工艺流程,还降低了对原料的限制,从而在保证产品质量的同时大幅降低成本与能耗。在此基础上,本发明通过对得到的精炼钢液进行单辊旋淬,再对得到的非晶带材产品进行热处理,即可得到具有优异软磁性能的FeSiB(C)非晶软磁合金,整体过程流程短,非晶产品能够一次成型,大幅简化了工艺流程,并进一步降低了生产成本与能耗、提高了生产效率,能够实现大规模工业化生产。且本发明提供的FeSiB(C)非晶软磁合金的制备方法单次产量可控,更能满足实际生产与应用的需求。

[0028] (2) 本发明提供的FeSiB(C)非晶软磁合金的制备方法充分利用了冶金工艺与非晶合金成型工艺之间的协同作用,能够在精确控制冶炼条件及合金成分的基础上,有效简化工艺流程,并大幅降低生产成本。并且,本发明提供的FeSiB(C)非晶软磁合金的制备方法能够对制备过程的工艺参数及产品的成分进行精确控制,产品质量并不依赖于原料质量,因而对原料纯度的要求较低、限制较少,能够在保证产品具有优异软磁性能的同时以较低的成本实现高效生产,具有较高的应用价值。

[0029] (3) 按照本发明提供的制备方法制得的FeSiB(C)非晶软磁合金,其磁感应强度≥1.55T,矫顽力≤3.2A/m,1KHz下有效磁导率≥8000,具有优异的综合软磁性能,能够满足实际应用的需求。

## 附图说明

[0030] 图1为本发明实施例1制备的FeSiB非晶软磁合金的XRD图。

[0031] 图2为本发明实施例1制备的FeSiB非晶软磁合金的磁滞回线。

- [0032] 图3为本发明实施例1制备的FeSiB非晶软磁合金的有效磁导率随频率变化图。
- [0033] 图4为本发明实施例3制备的FeSiBC非晶软磁合金的XRD图。
- [0034] 图5为本发明实施例3制备的FeSiBC非晶软磁合金的磁滞回线。
- [0035] 图6为本发明实施例3制备的FeSiBC非晶软磁合金的有效磁导率随频率变化图。

### 具体实施方式

[0036] 为了使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚,下面结合附图和具体实施例对本发明进行详细描述。

[0037] 在此,还需要说明的是,为了避免因不必要的细节而模糊了本发明,在附图中仅仅示出了与本发明的方案密切相关的结构和/或处理步骤,而省略了与本发明关系不大的其他细节。

[0038] 另外,还需要说明的是,术语“包括”、“包含”或者其任何其他变体意在涵盖非排他性的包含,从而使得包括一系列要素的过程、方法、物品或者设备不仅包括那些要素,而且还包括没有明确列出的其他要素,或者是还包括为这种过程、方法、物品或者设备所固有的要素。

[0039] 本发明提供了一种FeSiB(C)非晶软磁合金的制备方法,包括如下步骤:

[0040] S1、将铁矿石或铁矿石与硼砂的混合物作为反应原料,采用碳基还原或氢基还原的方式对所述反应原料进行还原熔炼,得到还原产物;

[0041] S2、对步骤S1得到的所述还原产物进行熔融除渣并合金化,得到精炼钢液;当步骤S1中所述反应原料为铁矿石时,所述熔融除渣后还加入了硼铁、硅铁进行所述合金化;

[0042] S3、采用单辊旋淬法对步骤S2得到的所述精炼钢液进行快速冷却,得到FeSiB(C)非晶带材;

[0043] S4、对步骤S3得到的所述FeSiB(C)非晶带材进行热处理,得到FeSiB(C)非晶软磁合金。

[0044] 其中,当步骤S1中采用所述碳基还原的方式进行还原熔炼时,在步骤S2中所述熔融除渣后还包括脱碳处理,在步骤S4中得到的为FeSiBC非晶软磁合金;

[0045] 当步骤S1中采用所述氢基还原的方式进行还原熔炼时,若步骤S2中所述熔融除渣后未进行增碳处理,则步骤S4中得到的为FeSiB非晶软磁合金;若步骤S2中所述熔融除渣后进行了增碳处理,则步骤S4中得到的为FeSiBC非晶软磁合金。

[0046] 在步骤S1中,所述碳基还原具体包括如下步骤:

[0047] 将所述反应原料粉碎后与还原剂煤粉或焦炭混匀,造团、干燥后放置于高温还原反应炉中,控制还原反应气氛为惰性气氛,还原温度为1000~1350℃,反应时间为10~60min,反应完成后,将得到的反应产物再破碎、磁选、熔分,得到的还原合金即为所述还原产物;

[0048] 或者,将所述反应原料造球、干燥后置于高温还原反应炉中,按照预定的流量通入CO还原气体;控制还原反应温度为900~1300℃,反应完成后,将得到的反应产物再破碎、磁选、熔分,得到的还原合金即为所述还原产物。

[0049] 所述氢基还原具体包括如下步骤:

[0050] 将所述反应原料造球、干燥后置于还原装置中,将氢基还原气体以预定速度通入

还原反应装置内,控制所述还原反应装置内的温度为900~1300℃,反应完成后,将得到的反应产物再破碎、磁选、熔分,得到的还原合金即为所述还原产物;

[0051] 或者,将所述反应原料制成粉状,与氢基还原气体经加热预处理后一同喷入闪速还原反应管道内,控制所述闪速还原反应管道内温度为900~1500℃,所述氢基还原气体和粉状的所述反应原料在所述闪速还原反应管道内下降的过程中完成闪速还原反应;所述闪速还原反应管道下部连通熔分装置,在1550~1700℃环境温度设置下,在所述熔分装置中收集得到还原合金,即为所述还原产物。

[0052] 在步骤S2中,所述合金化处理前还包括去除杂质处理,所述合金化的处理温度为1350~1600℃;所述精炼钢液的组成成分及其质量百分比包括:86.8%≤Fe≤96.2%、0.8%≤Si≤7.5%、1.6≤B≤3.0%、C≤0.5%、P≤0.01%、S≤0.01%、Mn≤0.02%、Ti≤0.005%、Al≤0.015%。在步骤S3中,采用所述单辊旋淬法时,设置铜辊线速度为20~60m/s,得到的所述FeSiB(C)非晶带材的厚度为15~50μm。

[0053] 在步骤S4中,所述热处理的方式为等温热处理,设置保温温度为240~420℃,保温时间为10~180min。

[0054] 本发明还提供了一种根据上述制备方法制备得到的FeSiB(C)非晶软磁合金;所述FeSiB(C)非晶软磁合金的化学式为 $Fe_aSi_bB_cC_dM_e$ ,其中,M代表微量元素Mn、P、S、Ti、Al中的一种或多种混合,下标a、b、c、d、e分别表示各组成成分的原子百分含量,且满足下述条件:78≤a≤84、2≤b≤9、8≤c≤14、0≤d≤2、e≤0.3、a+b+c+d+e=100。

[0055] 所述FeSiB(C)非晶软磁合金的饱和磁感应强度≥1.55T,矫顽力≤3.2A/m,1KHz下有效磁导率≥8000。

[0056] 下面结合具体的实施例对本发明提供的FeSiB(C)非晶软磁合金及其制备方法进行说明。

[0057] 实施例1

[0058] 本实施例提供了一种FeSiB非晶软磁合金的制备方法,包括如下步骤:

[0059] S1、以铁矿石为反应原料,采用氢基还原的方式,将该反应原料制成粉状,与载气N<sub>2</sub>混合后,再与氢基还原气体H<sub>2</sub>经加热预处理后一同喷入闪速还原反应管道中,控制闪速还原反应管道内的温度为反应温度为1100℃,反应2.0s后,进入与闪速还原反应管道下部连通的熔分装置中,在1600℃下收集得到还原铁粉;其中,反应原料的加料速率为100g/h,载气N<sub>2</sub>的流量为0.5L/min,氢基还原气体H<sub>2</sub>的流量为3L/min。

[0060] S2、对步骤S1得到的还原铁粉进行熔融除渣与脱硫处理,再加入硼铁、硅铁,在1550℃下进行合金化,得到精炼钢液;其中,铁矿石与硼铁、硅铁的质量比为21.5:2.5:1;得到的精炼钢液的组成成分及其百分含量包括:Fe 91.8%、Si 5.2%、B 2.9%、P 0.004%、C 0.001%、Mn 0.015%、S 0.008%、Ti 0.002%、Al 0.005%。

[0061] S3、控制钢液温度在1300℃,采用单辊旋淬法对步骤S2得到的所述精炼钢液进行快速冷却,设置铜辊线速度为40m/s,得到厚度为24μm的FeSiB非晶带材。

[0062] S4、将步骤S3得到的所述非晶带材置于管式真空退火炉中进行等温热处理,设置保温温度为420℃,保温时间为60min,此时保温温度低于晶化温度,得到FeSiB非晶软磁材料,其化学式为Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub>。

[0063] 其中,步骤S1中所述的铁矿石可以来源于天然富矿或人造富矿,其磷含量低于



0.1wt%。具体到本实施例中,使用的铁矿石的软化开始温度为1157℃,软化结束温度为1213℃,软化区间为56℃,熔滴温度为1479℃;该铁矿石的化学组成成分如表1所示。

[0064] 表1铁矿石的化学成分

组成	TFe	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	P	Cu	Mn	S	As	Zn	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
wt.%	54.9	0.92	8.25	4.95	3.9	0.76	3.34	0.08	<0.01	0.07	0.02	<0.01	0.02	0.25	0.09

[0066] 经测试,本实施例制备的FeSiB非晶软磁合金的XRD图、磁滞回线及其有效磁导率随频率的变化图分别如图1~3所示。由图2、图3可以看出,本实施例制备的FeSiB非晶软磁合金的饱和磁感应强度为1.58T,矫顽力为1.1A/m,1KHz下有效磁导率为12400。

[0067] 实施例2

[0068] 实施例2提供了一种化学式为Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub>的FeSiB非晶软磁合金的制备方法,与实施例1相比,不同之处在于步骤S1中将铁矿石与硼砂的混合物作为反应原料,并控制铁矿石与硼砂的质量比为6.3:1;同时,在步骤S2中未加入硼铁和硅铁;其余步骤均与实施例1一致,在此不再赘述。

[0069] 经测试,本实施例制备的Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub>非晶软磁合金的饱和磁感应强度为1.57T,矫顽力为1.2A/m,1KHz下有效磁导率为11500。

[0070] 实施例3

[0071] 实施例3提供了一种化学式为Fe<sub>83</sub>Si<sub>2</sub>B<sub>14</sub>C<sub>1</sub>的FeSiBC非晶软磁合金的制备方法,与实施例1相比,不同之处在于在步骤S2中还进行了增碳处理,即向还原铁粉中加入焦炭作为增碳剂,并控制增碳剂的添加量为低磷铁矿石的0.11%~0.12%,其余步骤均与实施例1一致,在此不再赘述。

[0072] 其中,本实施例步骤S2得到的精炼钢液的组成成分及其百分含量包括:Fe 96.0%、Si 1.2%、B 2.8%、P 0.005%、C 0.2%、Mn 0.015%、S 0.008%、Ti 0.004%、Al 0.01%。

[0073] 经测试,本实施例制备的FeSiBC非晶软磁合金的XRD图、磁滞回线及其有效磁导率随频率的变化图分别如图4~6所示。由图5、图6可以看出,本实施例制备的FeSiBC非晶软磁合金的饱和磁感应强度为1.67T,矫顽力为2.8A/m,1KHz下有效磁导率为10600。

[0074] 实施例4

[0075] 实施例4提供了一种化学式为Fe<sub>83</sub>Si<sub>2</sub>B<sub>14</sub>C<sub>1</sub>的FeSiBC非晶软磁合金的制备方法,与实施例2相比,不同之处在于在步骤S2中进行了与实施例3一致的增碳处理,其余步骤均与实施例2一致,在此不再赘述。

[0076] 经测试,本实施例制备的Fe<sub>83</sub>Si<sub>2</sub>B<sub>14</sub>C<sub>1</sub>非晶软磁合金的饱和磁感应强度为1.66T,矫顽力为3.2A/m,1KHz下有效磁导率为9000。

[0077] 实施例5

[0078] 实施例5提供了一种化学式为Fe<sub>83</sub>Si<sub>2</sub>B<sub>14</sub>C<sub>1</sub>的FeSiBC非晶软磁合金的制备方法,与实施例1相比,不同之处在于将步骤S1中的还原方式改为碳基还原,并在步骤S2中增加了脱碳处理,其余步骤均与实施例1一致,在此不再赘述。

[0079] 其中,碳基还原具体包括如下步骤:

[0080] 将所述反应原料粉碎后与还原剂煤粉混匀,造团、干燥后放置于高温气氛控制炉

中,控制还原反应气氛为惰性气氛,还原反应温度为1200℃,反应时间为30min,将得到的反应产物再破碎、磁选、熔分,得到还原合金。需要说明的是,在本发明的其他实施例中,该碳基还原过程的还原反应温度可以根据实际需要在1000~1350℃之间进行调整,反应时间可以在10~60min之间进行调整,均能够达到与本实施例类似的效果。

[0081] 经测试,本实施例制备的 $\text{Fe}_{83}\text{Si}_2\text{B}_{14}\text{C}_1$ 非晶软磁合金的饱和磁感应强度为1.66T,矫顽力为3.3A/m,1KHz下有效磁导率为8800。

[0082] 实施例6

[0083] 实施例6提供了一种化学式为 $\text{Fe}_{83}\text{Si}_2\text{B}_{14}\text{C}_1$ 的FeSiBC非晶软磁合金的制备方法,与实施例2相比,不同之处在于将步骤S1中的还原方式改为与实施例5一致的碳基还原,并在步骤S2中增加了与实施例5一致的脱碳处理,其余步骤均与实施例2一致,在此不再赘述。

[0084] 经测试,本实施例制备的 $\text{Fe}_{83}\text{Si}_2\text{B}_{14}\text{C}_1$ 非晶软磁合金的饱和磁感应强度为1.64T,矫顽力为4.6A/m,1KHz下有效磁导率为8000。

[0085] 根据上述实施例可以看出,本发明提供的方法工艺流程短、生产成本低、参数可控性强,能够满足大规模工业化生产的需求;且按照本发明提供的方法制备的FeSiB(C)非晶软磁合金均具有优异的综合软磁性能,能够满足实际应用的需求。

[0086] 同时,需要说明的是,本领域技术人员应当理解,在步骤S1中采用碳基还原的方式进行还原熔炼时,还可以将所述反应原料造球、干燥后置于高温还原反应炉中,按照3~4L/min的流量通入CO还原气体;控制还原反应温度为900~1300℃,反应完成后,将得到的反应产物再破碎、磁选、熔分,得到还原合金。在步骤S1中采用氢基还原的方式进行还原熔炼时,还可以将所述反应原料造球、干燥后置于还原装置中,将氢基还原气体以预定速度通入还原反应装置内,控制所述还原反应装置内的温度为900~1300℃,反应完成后,得到还原合金。在步骤S2中,合金化的处理温度可以根据需要在1350~1600℃之间进行调整;在步骤S3中,铜辊线速度可以在20~60m/s之间进行调整;在步骤S4中,热处理的保温温度可以在240~420℃之间进行调整,保温时间可以在10~180min之间进行调整,均属于本发明的保护范围。

[0087] 综上所述,本发明提供了一种FeSiB(C)非晶软磁合金及其制备方法。该制备方法以铁矿石或铁矿石与硼砂的混合物作为反应原料,采用碳基还原或氢基还原的方式对反应原料进行还原熔炼,将得到的还原产物熔融除渣并合金化,得到精炼钢液;再采用单辊旋淬法快速冷却精炼钢液,得到FeSiB(C)非晶合金带材;经热处理后,得到FeSiB(C)非晶软磁合金。通过上述方式,本发明能够有效利用冶金工艺与非晶合金成型工艺之间的协同作用,在精确控制冶炼条件的基础上有效简化工艺流程,控制杂质含量,并精确控制合金成分,大幅降低生产成本,在保证产品具有优异软磁性能的同时以低成本实现大规模高效生产,以满足工业化生产与应用的需求。

[0088] 以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非限制,尽管参照较佳实施例对本发明进行了详细说明,本领域的普通技术人员应当理解,可以对本发明的技术方案进行修改或者等同替换,而不脱离本发明技术方案的精神和范围。

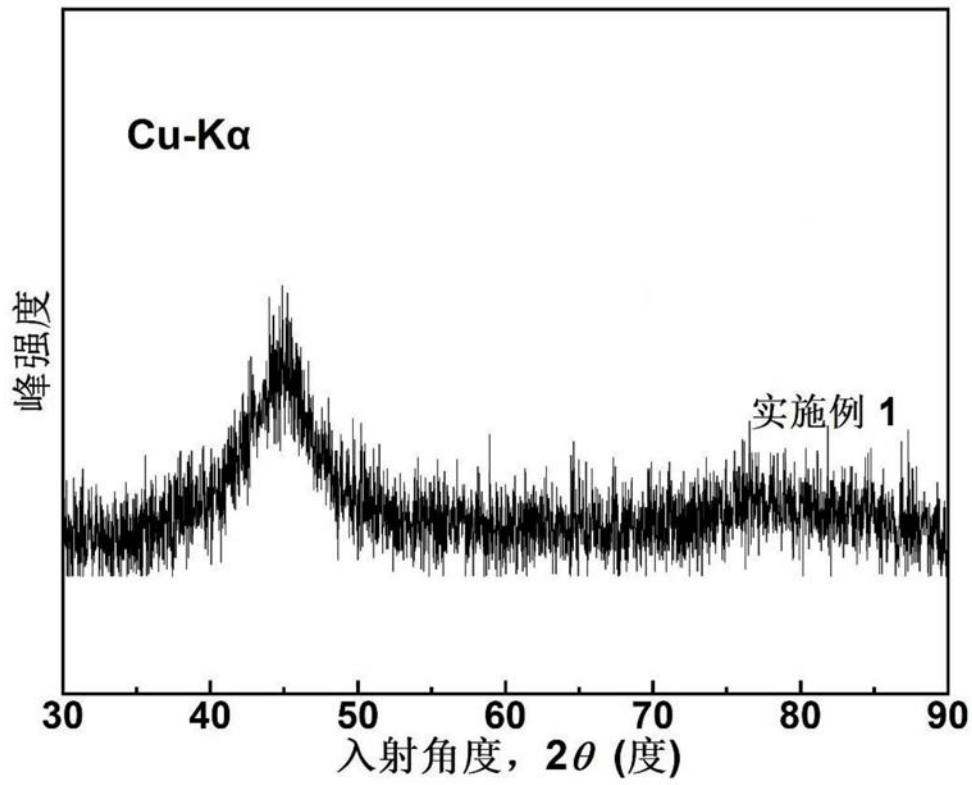


图1

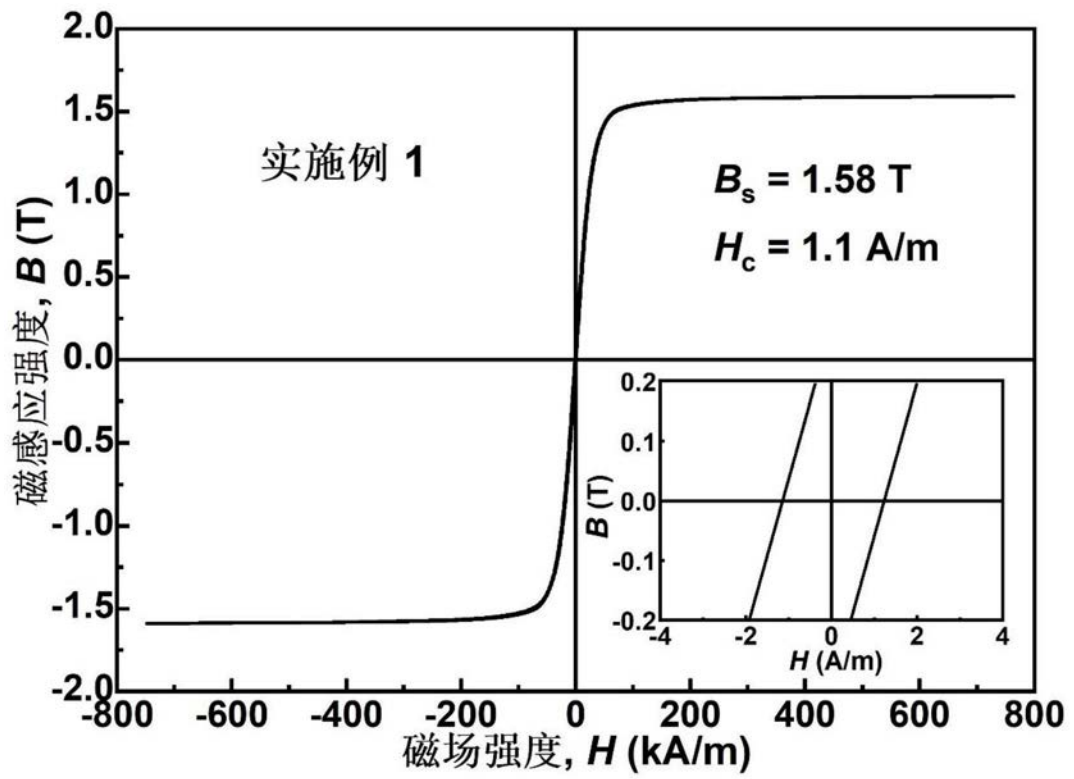


图2

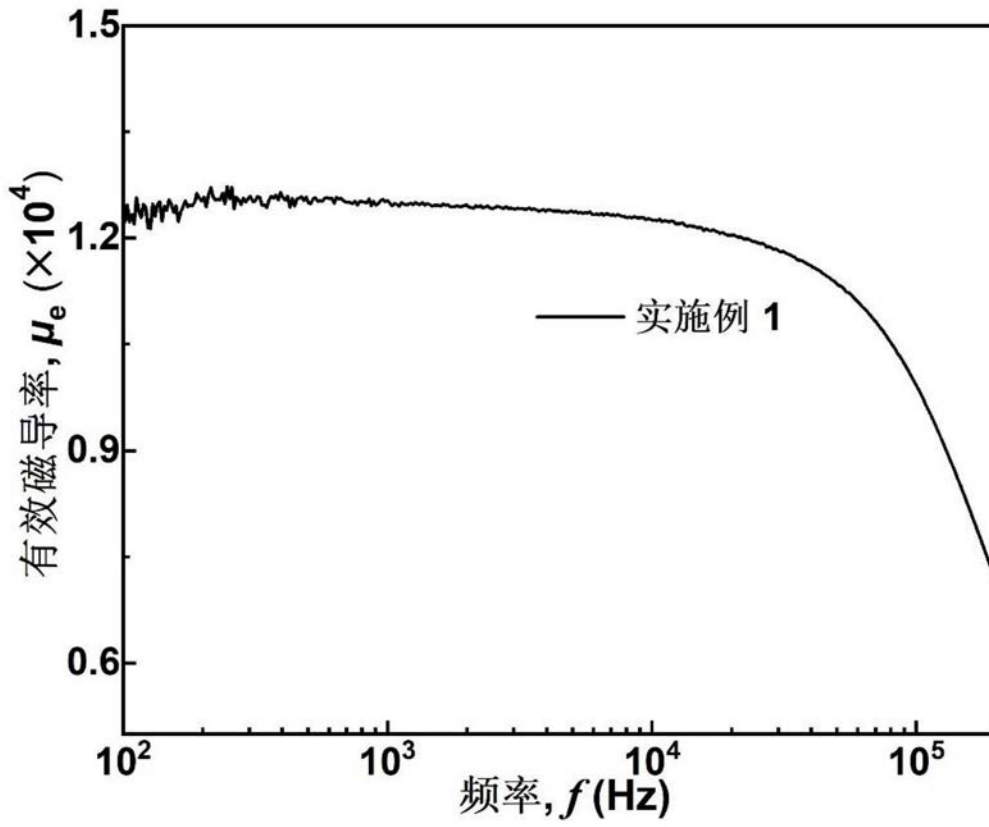


图3

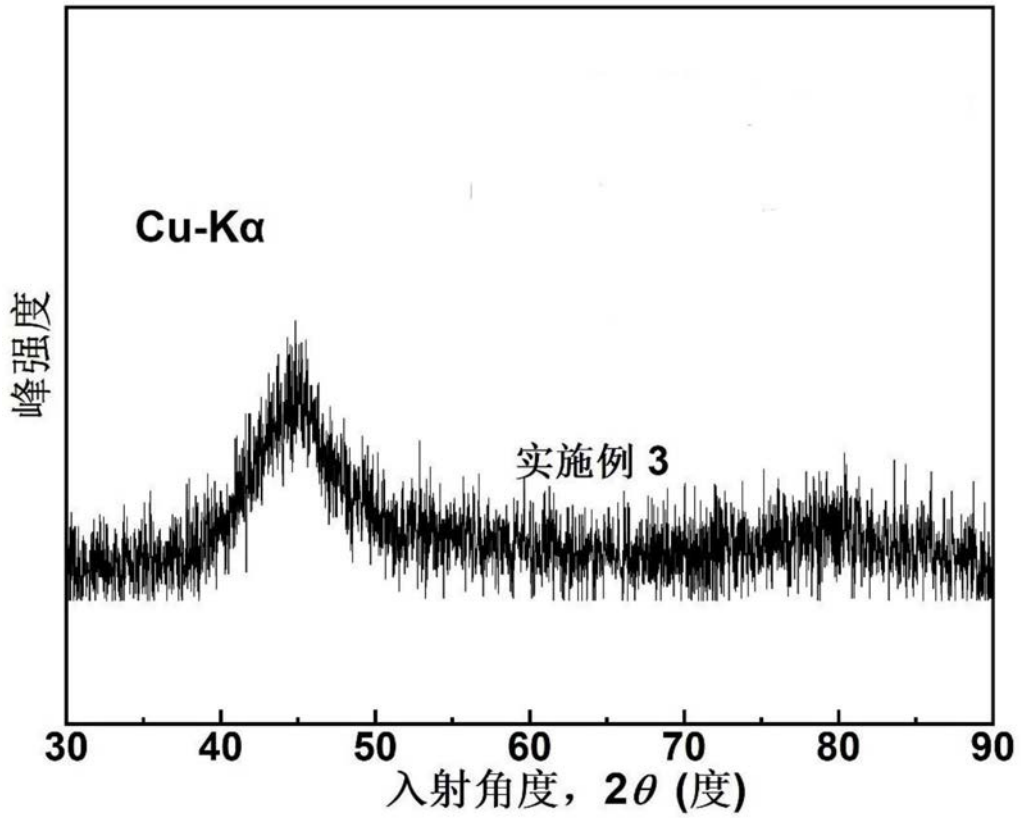


图4

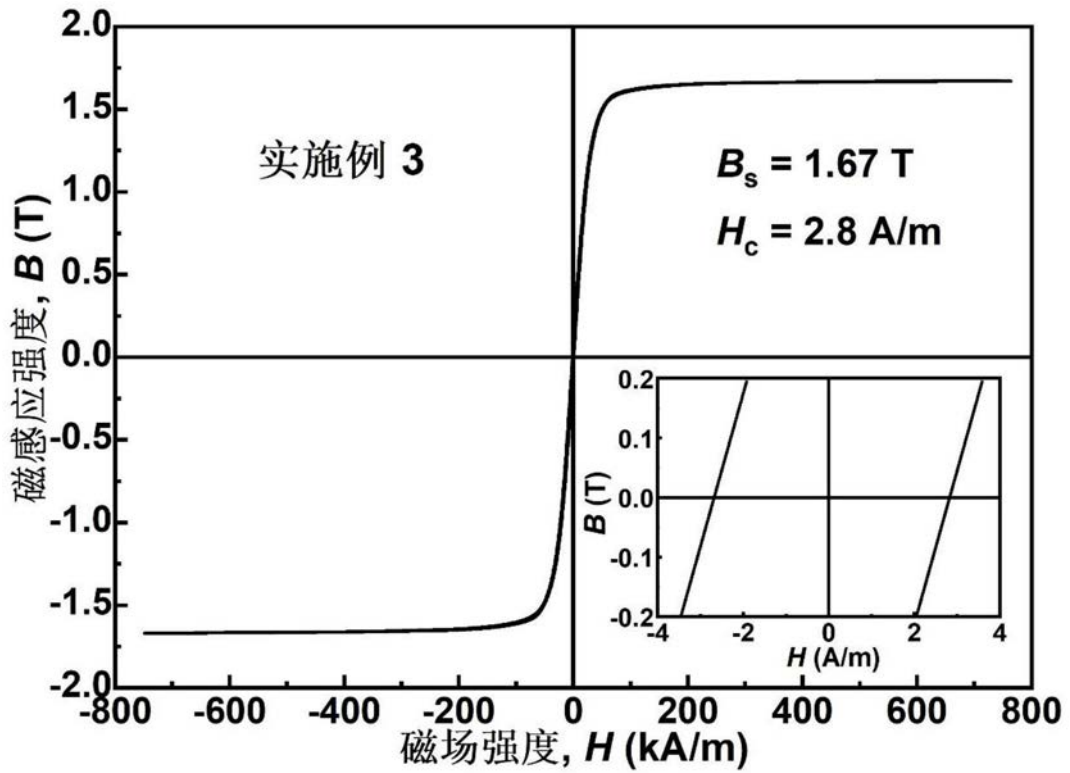


图5

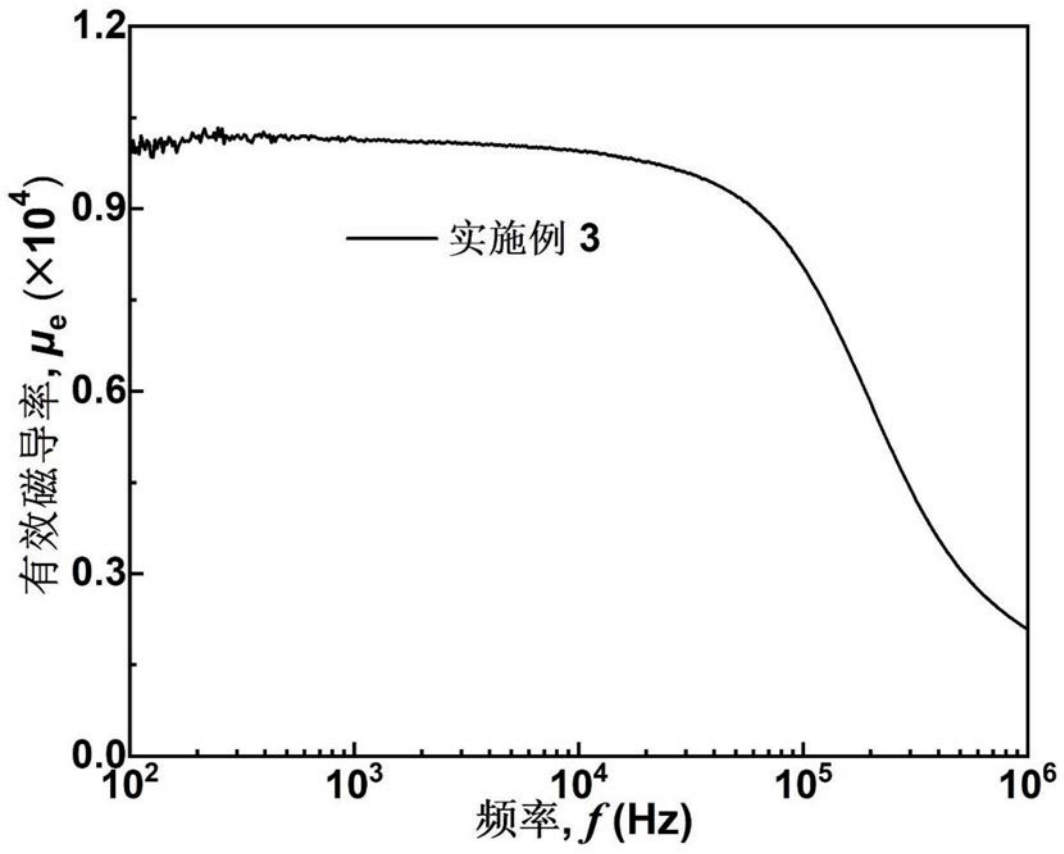


图6