



## (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116445817 A

(43) 申请公布日 2023. 07. 18

(21) 申请号 202310407143.3

(22) 申请日 2023.04.17

(71) 申请人 联合汽车电子有限公司

地址 201206 上海市浦东新区榕桥路555号

(72) 发明人 王志华

(74) 专利代理机构 上海专利商标事务所有限公

司 31100

专利代理师 喻学兵

(51) Int. Cl.

C22C 38/02 (2006.01)

C22C 38/04 (2006.01)

C22C 38/12 (2006.01)

C22C 38/14 (2006.01)

C21D 8/12 (2006.01)

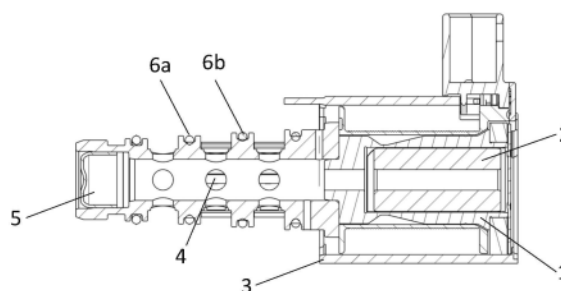
权利要求书1页 说明书7页 附图2页

(54) 发明名称

一种电磁阀用软磁钢及其制造方法

(57) 摘要

一种电磁阀用软磁钢,按重量比计其成分包括:0.06%-0.08%的C、不超过0.05%的Si、1.05%-1.20%的Mn、0.065%-0.075%的P和0.29%-0.32%的S,以及,0.003%-0.01%的Nb,0.0018%-0.01%的Ti和0.003%-0.03%的Mo。该软磁钢具有良好的力学性能与稳定的磁性能,能够有效提高变速箱电磁阀制造良品率,降低制造成本。本发明还提供一种电磁阀用软磁钢的制造方法。



1. 一种电磁阀用软磁钢,其特征在于,按重量比计其成分包括:  
0.06%-0.08%的C、不超过0.05%的Si、1.05%-1.20%的Mn、0.065%-0.075%的P和0.29%-0.32%的S,  
以及,0.003%-0.01%的Nb,0.0018%-0.01%的Ti和0.003%-0.03%的Mo。
2. 根据权利要求1所述的软磁钢,其特征在于,所述软磁钢抗拉强度 $\geq 300\text{MPa}$ ,屈服强度 $\geq 210\text{MPa}$ ,硬度HBW为110-150;  
矫顽力为150A/m-200A/m;  
磁感强度满足: $1.20\text{T} \leq B_{1000} \leq 1.42\text{T}$ ,  $1.46\text{T} \leq B_{2000} \leq 1.58\text{T}$ ,  $1.65\text{T} \leq B_{5000} \leq 1.70\text{T}$ ,  $1.77\text{T} \leq B_{10000} \leq 1.82\text{T}$ ,  $1.92\text{T} \leq B_{20000} \leq 1.96\text{T}$ ,  $2.01\text{T} \leq B_{30000} \leq 2.05\text{T}$ 。
3. 根据权利要求1或2所述的软磁钢,其特征在于,钢材组织中晶粒度等级为3-5级。
4. 一种电磁阀用软磁钢的制造方法,其特征在于,包括以下步骤:  
对钢坯进行热轧,初轧温度 $870^{\circ}\text{C}$ - $920^{\circ}\text{C}$ ,终轧温度 $910^{\circ}\text{C}$ - $940^{\circ}\text{C}$ ,并加工为棒材;  
对所述棒材进行冷拔加工,所述棒材经过冷拔加工减面率为7%-18%;  
对经过冷拔加工的所述棒材在 $780^{\circ}\text{C}$ - $860^{\circ}\text{C}$ 条件下保温8-20h以完成磁性热处理。
5. 根据权利要求4所述的软磁钢的制造方法,其特征在于,所述棒材成分包括:  
0.06%-0.08%的C、不超过0.05%的Si、1.05%-1.20%的Mn、0.065%-0.075%的P和0.29%-0.32%的S,  
以及,0.003%-0.01%的Nb,0.0018%-0.01%的Ti和0.01%-0.03%的Mo。
6. 根据权利要求4或5所述的软磁钢的制造方法,其特征在于,所述冷拔加工减面率为10.25%-13.22%,进行磁性热处理的加热温度为 $820 \pm 20^{\circ}\text{C}$ ,磁性热处理时间为12h。
7. 根据权利要求4或5所述的软磁钢的制造方法,其特征在于,还包括熔炼棒材的步骤,所述熔炼棒材的步骤中,出钢时控制残余O含量在40ppm-100ppm,所述棒材中的硫化物符合SEP1572标准2.2或2.3,夹杂物等级小于2。
8. 根据权利要求4或5所述的软磁钢的制造方法,其特征在于,在对所述棒材进行热轧前,首先将所述棒材加热至 $1170^{\circ}\text{C}$ - $1190^{\circ}\text{C}$ 保温2h-4h。
9. 根据权利要求4或5所述的软磁钢的制造方法,其特征在于,所述磁性热处理过程中,首先将经过冷拔加工的所述棒材预热至 $650 \pm 20^{\circ}\text{C}$ 保温2h,再经过3.5h加热至磁性热处理温度;在完成保温后首先经过7h降温至 $650 \pm 20^{\circ}\text{C}$ ,再随炉冷却至 $200 \pm 20^{\circ}\text{C}$ 出炉。
10. 根据权利要求4或5所述的软磁钢的制造方法,其特征在于,还包括研磨步骤,将经过磁性热处理的所述棒材研磨加工至所需尺寸得到钢材成品。
11. 根据权利要求10所述的软磁钢的制造方法,其特征在于,所述研磨步骤的加工量为单边0.02mm-0.03mm。

## 一种电磁阀用软磁钢及其制造方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于钢铁领域,具体涉及一种电磁阀用软磁钢及其制造方法。

### 背景技术

[0002] 变速箱电磁阀是汽车自动变速箱实现功能的核心元件,变速箱控制器通过控制电磁阀作动来实现自动变速箱中离合器、制动器、液力变矩器等部件的运动,从而实现自动换挡功能。变速箱电磁阀用于控制管路中压力流体的通断、流向,调节压力,消除液压冲击,在服役周期中需要长期进行快速、精确的响应。因此,对制造变速箱电磁阀的软磁钢要求很高,需要同时满足良好的机械强度、切削性能和稳定的磁性能。电磁阀衔铁与磁性套目前大量采用进口11SMn30钢制造,但目前进口材料成本高昂,磁学性能特别是矫顽力、磁感强度等关键指标波动大,无法精确控制,导致实际生产中零件报废率高,生产效率较低。目前,行业内对于软磁钢加工制造参数对磁性能的影响还不充分,批量生产的软磁钢难以达到理想的磁性能,不同批次的产品之间磁性能波动十分明显,如何指定能够获得符合设计要求的具有稳定磁性能的软磁钢材料的制造参数始终是业内的难题。因此,提供一种具有稳定磁性能的电磁阀用软磁钢及其制造方法,对降低生产成本、提高产品质量、提高汽车产业关键零部件国产化率有重要的意义。

### 发明内容

[0003] 本发明的目的在于,提供一种软磁钢,具有稳定的磁性能,以降低磁性能波动导致的电磁阀产品报废率。本发明进一步提供一种具有稳定磁性能的电磁阀用钢的制造方法。

[0004] 根据本发明一个方面的实施例,提供一种具有稳定磁性能的软磁钢,按重量比计其成分包括:0.06%-0.08%的C、不超过0.05%的Si、1.05%-1.20%的Mn、0.065%-0.075%的P和0.29%-0.32%的S,以及,0.003%-0.01%的Nb,0.0018%-0.01%的Ti和0.003%-0.03%的Mo。

[0005] C元素影响钢材硬度,对机械性能有显著影响,但C是奥氏体形成元素,对磁性能有负面影响,因此在常规11SMn30钢的成分基础上进一步将C元素含量限制在0.06%-0.08%。S有利于改善钢材的切削性能,但过量的S会损害钢材的力学性能。Nb、Ti、Mo属于铁素体形成元素,有利于提高钢材的磁性能。

[0006] 进一步地,该软磁钢的性能满足:抗拉强度 $\geq 300\text{MPa}$ ,屈服强度 $\geq 210\text{MPa}$ ,硬度HBW为110-150,矫顽力为150A/m-200A/m;磁感强度满足 $1.20\text{T} \leq B_{1000} \leq 1.42\text{T}$ , $1.46\text{T} \leq B_{2000} \leq 1.58\text{T}$ , $1.65\text{T} \leq B_{5000} \leq 1.70\text{T}$ ,

[0007]  $1.77\text{T} \leq B_{10000} \leq 1.82\text{T}$ , $1.92\text{T} \leq B_{20000} \leq 1.96\text{T}$ , $2.01\text{T} \leq B_{30000} \leq 2.05\text{T}$ 。同时稳定满足力学性能与磁学性能才能够更好地应用于电磁阀制造,降低产品报废率。通常电磁阀用11SMn30钢要求矫顽力 $H_c \leq 250\text{A/m}$ ,发明人在实践中发现,进一步将矫顽力的数值范围限制在150A/m-200A/m能够使采用该钢材制造的电磁阀获得更稳定的响应速度与精度,不容易发生超差,提高产品的合格率。

[0008] 进一步地,该软磁钢组织中晶粒度等级为3-5级。细晶组织有利于提高钢材力学性能,而尺寸较大的晶粒才能够维持稳定的磁性能。

[0009] 根据本发明另一个方面的实施例,提供一种软磁钢制造方法,该方法包括以下步骤:对钢坯进行热轧,初轧温度870℃-920℃,终轧温度910℃-940℃,并加工为棒材;对热轧后的棒材进行冷拔加工,冷拔减面率为7%-18%;对经过冷拔加工的棒材在780℃-860℃条件下保温8-20h以完成磁性热处理。

[0010] 经过上述热处理工序能够使该电磁阀用钢内形成尺寸合适而均匀的晶粒结构,析出物分布均匀弥散,使钢材在具备良好的力学性能和切削性能的同时,具备稳定的磁性能,矫顽力、剩磁、磁饱和强度和磁感强度均能够控制在设计要求范围内,不发生超差。

[0011] 进一步地,该制造方法所采用的所述棒材成分包括:0.06%-0.08%的C、不超过0.05%的Si、1.05%-1.20%的Mn、0.065%-0.075%的P和0.29%-0.32%的S,以及,0.003%-0.01%的Nb,0.0018%-0.01%的Ti和0.01%-0.03%的Mo。在商用11SMn30钢成分范围内制造的钢材不能实现稳定的磁性能,在矫顽力与磁感强度等指标上容易出现超差。因此,需要在通用11SMn30钢成分基础上进一步限制对磁性能不利的C元素成分含量,并增加有助于改进磁性能的Nb、Ti、Mo等元素。

[0012] 优选地,所述冷拔加工减面率为10.25%-13.22%,进行磁性热处理的加热温度为 $820\pm 20^{\circ}\text{C}$ ,磁性热处理的时间为12h。

[0013] 进一步地,该制造方法还包括熔炼棒材的步骤,所述熔炼棒材的步骤中,出钢时控制残余O含量在40ppm-100ppm,所述棒材中的硫化物符合SEP1572标准2.2或2.3,夹杂物等级小于2。为了实现良好力学性能、切削性能与磁性能,需要对棒材的组织进行严格的控制。对残余O含量进行控制以减少氧化物夹杂;硫化物分布影响钢材的切削性能。

[0014] 进一步地,在对所述棒材进行热轧前,首先将所述棒材加热至1170℃-1190℃保温2h-4h。通过预热保温确保棒材在进行热轧前内外温度分布均匀,降低棒材内的组织缺陷。

[0015] 进一步地,所述磁性热处理过程中,首先将所述棒材预热至 $650\pm 20^{\circ}\text{C}$ 保温2h,再经过3.5h加热至 $820\pm 20^{\circ}\text{C}$ ;在完成保温后首先经过7h降温至 $650\pm 20^{\circ}\text{C}$ ,再随炉冷却至 $200\pm 20^{\circ}\text{C}$ 出炉。磁性热处理过程中对升温与降温过程进行控制,以确保钢材半成品组织均匀。

[0016] 进一步地,该制造方法还包括研磨步骤,将经过磁性热处理的所述钢材半成品研磨加工至所需尺寸。经过磁性热处理的钢材半成品经过再结晶后组织均匀,不能再通过机械变形如拉拔或墩粗引入变形和残余应力,否则会导致磁性能不稳定。

[0017] 进一步地,所述研磨步骤的加工量为单边0.02mm-0.03mm。研磨加工量过高增加加工时消耗,研磨加工量过低则导致产品表面质量不合格。

## 附图说明

[0018] 图1a为一实施例中电磁阀局部结构示意图;

[0019] 图1b为一实施例中磁性套与衔铁结构示意图;

[0020] 图1c为一实施例中磁性套剖面结构示意图;

[0021] 图1d为一实施例中衔铁剖面结构示意图;

[0022] 图2为一实施例中不同磁场强度下钢材中磁感应强度B的范围曲线。

[0023] 上述附图的目的在于对本发明作出详细说明以便本领域技术人员能够理解本发

明的技术构思,而非旨在限制本发明。为了表达简洁,上述附图仅示意性地画出了与本发明技术特征有关的结构,并未严格按照实际比例画出完整结构与全部细节。

### 具体实施方式

[0024] 下面通过具体实施例结合附图对本发明作出进一步的详细说明。

[0025] 本文中提及“实施例”意味着,结合实施例描述的特定特征、结构或特性可以包含在本文的至少一个实施例中。在说明书的各个位置出现的该短语并不一定指代同一实施例,也并非限定为互斥的独立或备选的实施例。本领域技术人员应当能够理解,在不发生原理冲突的前提下本文中的实施例可以与其他实施例相结合。

[0026] 汽车自动变速箱中设置有多种电磁阀,以控制变速箱中的液力系统,实现换挡、扭矩转换等复杂动作。随着自动变速箱结构与功能的日益复杂,对电磁阀的响应速度、运动精度的要求也越来越高。在一个实施例中,如图1a所示的电磁阀中,电磁阀衔铁2和磁性套1的材料对于电磁阀的整体性能至关重要。结合图1b-图1d,磁性套1与电磁阀壳体3相对固定连接,衔铁2嵌套于磁性套1内部的空腔11中,当电磁阀通电,磁性套1与衔铁2产生同向感生磁场,下衔铁2受到磁性套1的吸引,沿轴向向左移动,衔铁2内设置有阀杆4的安装孔21,阀杆4一端穿过磁性套1端部的通孔12并固定连接于安装孔21中,衔铁2在运动时带动电磁阀阀杆4移动。阀杆4上设置有径向贯穿的通孔(未示出),当阀杆4运动到不同位置时通孔可以分别与不同的油路6a或6b相接通或错开,以实现油路的调节。阀杆4的另一端连接与复位装置5相连,在复位装置5的作用下一旦磁性套1与衔铁2之间的磁力减弱,阀杆4将被推动向右移动。由此,通过电磁阀的电流强弱控制磁性套1与衔铁2之间的磁力大小,进而实现对液路的精确控制。由于衔铁2与磁性套1的结构精度要求很高,电磁阀磁性材料需要具备良好的切削性能,以确保机械加工的尺寸精度;还需要满足强度要求,以在长期高频高强度服役条件下达到设计寿命要求;同时,还需要具有稳定的磁性能,以确保电磁阀作动的响应速度和精度。目前,电磁阀通常采用易切削的11SMn30钢制造,通常国产11SMn30钢仅作为机械加工原料生产,对磁性能缺少把控,无法满足电磁阀制造的需求;而即使是进口专用钢材,也常常出现矫顽力等关键性能超差导致产品报废率上升的情况。当前,本领域内对11SMn30钢的研究较少,对如何精确控制钢材的成分与加工工艺以获得磁性能稳定的产品更是缺乏认识与技术积累。由于11SMn30钢从原料冶炼到成品加工流程较长,其中每一个环节都会对最终的磁性能产生影响,钢铁生产企业、机械加工企业或电磁阀生产企业在各自工序范围内对工艺参数的研究与优化难以将影响最终成品质量的因素有效关联起来,因此始终难以提供符合质量要求的钢材成品。

[0027] 为了解决上述问题,发明人经过大量研究与试验,从原料环节入手跟踪并分析了电磁阀生产加工的完整流程,综合地对冶炼、热处理、机械加工进行分析与验证,提出了一种具有稳定磁性能的电磁阀用钢及其制造方法。

[0028] 根据本发明一个方面的实施例,提供一种具有稳定磁性能电磁阀用钢。常规商用11SMn30钢作为机加工原料,按重量比计,其成分为0.04%-0.1%的C,不超过0.09%的Si, 0.09%-1.26%的Mn,不超过0.15%的P和0.25%-0.35%的S。而本发明实施例所提供的具有稳定磁性能的电磁阀用钢进一步要求C含量为0.06%-0.08%,Si含量不超过0.05%,Mn含量为1.05%-1.20%,P含量为0.065%-0.075%,S含量为0.29%-0.32%,并进一步添加

0.003%-0.01%的Nb、0.0018%-0.01%的Ti和0.01%-0.03%的Mo。其中,C、Mn属于奥氏体形成元素,有利于提高强度和韧性,不利于成品钢材的磁性能;Si、Nb、Ti、Mo属于铁素体形成元素,对成品钢材的磁性能有利,其中Nb和Ti同时用于调节改善成品钢材的力学性能。该电磁阀用钢成品组织晶粒度为3-5级,具有良好的力学性能、切削性能和稳定的磁性能。该电磁阀用钢成品抗拉强度 $\geq 300\text{MPa}$ ,屈服强度

[0029]  $\geq 210\text{MPa}$ ,硬度HBW为110-150。磁性能方面,矫顽力 $H_c$ 为150A/m-200A/m;该电磁阀用钢在不同外界磁场强度H下的磁感应强度B的数值范围满足如图2所示的B-H曲线,在1000A/m下的磁感应强度 $B_{1000}$ 、2000A/m下的磁感应强度 $B_{2000}$ 、5000A/m下的磁感应强度 $B_{5000}$ 、

[0030] 10000A/m下的磁感应强度 $B_{10000}$ 、20000A/m下的磁感应强度 $B_{20000}$ 及30000A/m下的磁感应强度 $B_{30000}$ 分别满足 $1.20\text{T} \leq B_{1000} \leq 1.42\text{T}$ ,

[0031]  $1.46\text{T} \leq B_{2000} \leq 1.58\text{T}$ ,  $1.65\text{T} \leq B_{5000} \leq 1.70\text{T}$ ,  $1.77\text{T} \leq B_{10000} \leq 1.82\text{T}$ ,

[0032]  $1.92\text{T} \leq B_{20000} \leq 1.96\text{T}$ ,  $2.01\text{T} \leq B_{30000} \leq 2.05\text{T}$ 。上述性能指标确保该电磁阀用钢在具有良好的力学性能基础上,能够满足电磁阀快速响应、精确作动的要求。

[0033] 根据本发明另一个方面的实施例,提供一种电磁阀用钢制造方法,该方法包括以下步骤:

[0034] 首先对钢坯进行热轧,初轧温度控制在 $870^{\circ}\text{C}$ - $920^{\circ}\text{C}$ ,终轧温度控制在 $910^{\circ}\text{C}$ - $940^{\circ}\text{C}$ 。热轧过程打碎钢坯凝固过程中形成的柱状晶,将组织结构转变为相对均匀细小的等轴晶,促使钢坯组织中的析出物重新分布,形成弥散、均匀、细小的强化相。将钢坯加工为棒材。

[0035] 接下来,以适宜的参数对棒材进行冷拔加工,最后进行磁性热处理以获得稳定的磁性能与合格的力学性能。通常,对经过热轧加工得到的棒材,在7%-18%的范围内进行冷拔加工,并对经过冷拔加工的所述棒材在 $780^{\circ}\text{C}$ - $860^{\circ}\text{C}$ 条件下8-20h的保温时长范围内进行磁性热处理,以获得具有稳定磁性能的软磁钢。

[0036] 具体对本实施例所采用的钢材,首先制备热轧棒材,接下来选取冷拔加工减面率为10.25%-13.22%,优选的最佳减面率 $q=12.8\%$ 。冷拔过程在棒材中引入塑性变形,作为后续热处理过程中固态相变的驱动力。

[0037] 最后对冷拔加工后的半成品钢材加热到居里温度以上进行消磁,经迭代测试锁定工艺为在 $780^{\circ}\text{C}$ - $860^{\circ}\text{C}$ 条件下进行12h的磁性热处理,优选为 $820 \pm 20^{\circ}\text{C}$ ,使变形晶粒发生充分再结晶,成为均匀细小的晶粒组织,使晶粒尺寸满足力学性能与磁性能要求。应当理解,根据冷拔过程中变形程度的不同,磁性热处理温度能在温度范围内进行适应性调整。

[0038] 其中,棒材的化学成分控制为0.06%-0.08%的C、不超过0.05%的Si、1.05%-1.20%的Mn、0.065%-0.075%的P和0.29%-0.32%的S,以及,0.003%-0.01%的Nb,0.0018%-0.01%的Ti和0.003%-0.03%的Mo。其中,C元素有利于增强钢材的力学性能,但会对磁性能形成不良影响;Mn能增强钢材的韧性,但会促进奥氏体形成进而损害成品的磁性能;P与S过量会导致力学性能的显著削弱,但当其控制在一定范围内时能够显著改善钢材的切削性能;Si元素对钢材的磁性能有显著影响,需要对其成分含量进行准确控制;发明人经过长期研究后发现为了实现该电磁阀用钢力学性能与磁性能的平衡还需要额外添加Nb、Ti与Mo,这些元素在改善钢材磁性能的同时也有利于提高成品钢材的力学性能。在棒材熔炼过程中,出钢时控制残余O含量在40ppm-100ppm,棒材中硫化物符合SEP1572标准2.2或

2.3, 夹杂物等级小于2, 以确保成品钢材的组织稳定, 能够通过后续加工获得力学性能合格、磁性能稳定的成品钢材。

[0039] 在对棒材进行热轧前, 首先对棒材进行加热, 将棒材加热至1170℃-1190℃保温2h-4h。加热过程优选在不超过950℃时进行至少一次预热处理, 使棒材内外温度一致, 再进一步加热升温, 该预热处理的温度、分段及保温时间应当根据热处理炉实际的加热能力进行适应性选择。在加热过程中, 通过对热轧设备冷却水量和冷却空气的流量进行调节, 控制冷却速率, 使初轧温度始终维持在870℃-920℃, 终轧温度维持在910℃-940℃。温度过低将导致热轧不充分, 而温度过高则将导致晶粒尺寸过大, 损害成品钢材的力学性能。

[0040] 在磁性热处理阶段, 首先将棒材预热至650±20℃保温2h, 再加热至820±20℃进行保温12h的磁性热处理, 随后经7h降温至650±20℃, 再随炉冷却至200±20℃出炉, 完成热处理过程。本领域技术人员应当理解, 对于通用热处理炉, 在给出了起始温度、目标温度与加热/降温时间的基础上, 热处理炉能够基于自身PLC控制系统实现对温度的反馈调节, 进而完成加热/降温过程的温度控制, 加热/降温过程以近似匀速的过程实现, 受不同热处理炉加热、散热能力和控制器精度的限制, 温度可能在正常热处理参数范围内有合理的小幅度波动。

[0041] 由于冷拔过程中, 随着变形量增加, 成品材料的磁性能会发生高阶变化, 成品磁性能稳定性对冷拔加工过程中的减面率十分敏感; 同时, 在完成磁性热处理后再对材料施加塑性变形会对磁性能产生影响, 而切削加工会在表面引入残余应力层同样会对钢材的磁性能产生显著干扰。因此, 该电磁阀用钢在热轧阶段就需要对零件尺寸进行控制, 在完成冷拔加工后棒材尺寸应与成品尺寸相近, 仅保留加工余量, 在完成磁性热处理后采用研磨加工的方式将棒材加工为钢材成品, 在优选实施例中研磨加工单边加工量控制在0.02mm-0.03mm。研磨加工量过低将导致钢材表面粗糙度不达标, 而研磨加工量过高则导致加工损耗过大, 降低生产效率。

[0042] 通过上述方法在批量生产中能够获得磁性能稳定的软磁钢棒材, 用于进行电磁阀生产制造, 整体合格率显著优于进口11SMn30钢, 有效提高了生产效率, 降低了零件制造成本。

[0043] 发明人在长期实践中, 尝试过先锁定热处理参数再调节冷拔变形率的研发路线, 但经过大量尝试后发明人认识到, 由于冷拔变形过程中一旦减面率达到一定数值, 材料塑性变形会发生晶界滑移, 样品磁性能会发生非线性变化导致磁性能变化规律难以掌握, 最终发明人才确定了上述工艺开发方法。

[0044] 在本发明的一个实施例中, 采用如下方法制造用于变速箱电磁阀的软磁钢。

[0045] 首先, 熔炼钢材, 对钢材成分进行调控, 按重量比计控制成分: C含量0.06%-0.08, Si含量≤0.05%, Mn含量1.05%-1.20%, P含量0.065%-0.075%, S含量0.29%-0.32%, Cr含量≤0.15%, Ni含量≤0.10%, Mn含量0.01%-0.03%, Nb含量0.003%-0.01%, Ti含量0.018%-0.01%, Mo含量0.01%-0.03%。对成分进行控制的原则为在确保力学性能合格的基础上尽量调节有利于磁性能的元素成分配比。在高炉中熔炼得到铁水, 铁水转移至转炉中炼钢, 随后将钢水转移至精炼炉进行精炼, 最终连铸得到钢坯。对钢材中的硫化物指标按照SEP1572标准检验, 其典型视场应符合图谱2.2或2.3, 以确保成品钢材的切削性能。在冶炼炉出钢时, 控制残余O含量为40-100ppm; 对扒渣过程进行规范化操作, 避免外来夹杂物混

入钢材,内生夹杂物分布应细小、均匀、弥散,夹杂物等级小于2。

[0046] 接下来对钢坯进行热轧。在开始热轧前首先对钢坯进行加热,采用分段加热方式逐步将钢坯加热至1170℃-1190℃保温2h-4h,加热可首先在950℃以下进行一段预热以使钢坯内外温度均匀,在其他实施例中,根据热处理炉的加热及保温能力可以采取两段或更多段预热。通过调节热轧设备水冷及气冷的流量来将钢坯初轧温度控制在870℃-920℃,将终轧温度控制在910℃-940℃,完成钢坯轧制。轧制过程中,钢坯凝固过程中形成的柱状晶被打碎,组织中的凝固缺陷被消除,析出相得以重新分布,组织得到改善。由于后续冷拔加工对钢坯引入的塑性变形有严格限制,热轧过程中就应当对钢坯的尺寸进行控制,使冷拔加工后的钢坯尺寸能够与成品尺寸相近,仅保留加工余量。本实施例中,根据成品尺寸,在保留单边0.02mm加工余量的情况下按照减面率计算,热轧后的钢坯加工为直径 $19\pm 0.1\text{mm}$ 的圆棒。

[0047] 对热轧后的棒材利用联合拉拔机进行冷拔加工,控制冷拔加工减面率 $q$ 为11.24%,将棒材拉拔至直径17.9mm随后进行矫直、切断、抛光和探伤。冷拔加工后的棒材与最终成品相比,单边保留0.02mm-0.03mm的加工余量。

[0048] 对冷拔加工后的棒材进行磁性热处理,热处理采用燃气罩式炉进行。首先将棒材预热至648℃保温2h,再经3.5h加热至825℃保温12h,保温完成后经7h降温至650℃,随后随炉冷却至200℃,出炉。上述过程通过将目标温度与时间输入热处理炉,由热处理炉自动完成。经过磁性热处理,冷拔过程中引入的塑性变形驱动晶粒发生再结晶,保温温度、时间以及后续降温过程的冷却速率对最终形成的组织有关键影响,其中磁性热处理完成后的晶粒度为3-5级,以同时满足材料的力学性能与磁性能的要求。

[0049] 最后,对经过磁性热处理的钢材研磨加工至所需要的尺寸,研磨加工量为单边0.02mm-0.03mm。在完成磁性热处理后,不应再对钢材进行塑性变形加工或切削加工这样改变晶粒结构或引入较高残余应力的加工,以确保成品的磁性能稳定。

[0050] 经过上述加工过程得到的批量生产的电磁阀用钢,力学性能满足:抗拉强度达357MPa,屈服强度265MPa,硬度HBW为128;磁性能满足:矫顽力为188A/m;在不同外加磁场下的磁感强度满足: $B_{1000}=1.433\text{T}$ , $B_{2000}=1.568\text{T}$ , $B_{5000}=1.693\text{T}$ , $B_{10000}=1.807\text{T}$ , $B_{20000}=1.953\text{T}$ ,

[0051]  $B_{30000}=2.048\text{T}$ 。力学性能与磁性能均满足设计要求。同时,该钢材具有良好的切削性能。利用该钢材加工制造变速箱电磁阀,相应速度快、作动精确,同时具有良好的耐久性能,能够在自动变速箱内长期服役,有效提高了电磁阀产线合格率,降低了报废风险,实现制造成本的有效优化。

[0052] 在第一对比例中,钢材成分控制为C含量0.04%-0.06%,Si含量

[0053]  $\leq 0.09\%$ ,Mn含量0.99%-1.26%,P含量 $\leq 0.15\%$ ,S含量0.25%-0.35%,经与实施例相同的热轧、冷拔加工和磁性热处理后,测试结果抗拉强度为290MPa,力学性能不合格。

[0054] 在第二对比例中,钢材成分控制为C含量0.06%-0.08%,Si含量

[0055]  $\leq 0.09\%$ ,Mn含量0.99%-1.26%,P含量 $\leq 0.15\%$ ,S含量0.25%-0.35%,经与实施例相同的热轧、冷拔加工和磁性热处理后,该样品经测试力学性能符合设计标准,但磁性能发生超差,矫顽力达270A/m,超出上限值。矫顽力过高会导致电磁阀电流发生变化时磁性

套与衔铁响应时间延长,使电磁阀作动迟缓,影响控制精度。

[0056] 在第三对比例中,钢材成分及热轧加工参数控制与第一实施例相同,在冷拔加工过程中棒材由直径19mm冷拔至18.5mm,经与第一实施例相同的磁性热处理后,进一步轻拉至直径17.5mm。所得样品经测试,由于轻拉引入了塑性变形,棒材晶粒结构发生畸变,测得其矫顽力 $H_c=350\text{A/m}$ ,超出了限值。

[0057] 在第四对比例中,钢材成分控制与第一实施例相同,热轧过程中初轧温度控制为 $870^{\circ}\text{C}$ - $910^{\circ}\text{C}$ ,由于冷却速率控制不当,终轧温度为 $800^{\circ}\text{C}$ ,经与第一实施例相同的冷拔加工和磁性热处理后,该样品经测试力学性能与磁性能均发生超差,其中抗拉强度仅为280MPa,矫顽力超出上限值达290A/m,不符合设计要求。

[0058] 上述实施例的目的在于结合附图对本发明作出进一步的详细说明,以便本领域技术人员能够理解本发明的技术构思。在本发明权利要求的范围内,对所涉及的成分、方法及步骤进行优化或等效替换,以及在不发生原理冲突的前提下对不同实施例中的实施方式进行结合,均落入本发明的保护范围。

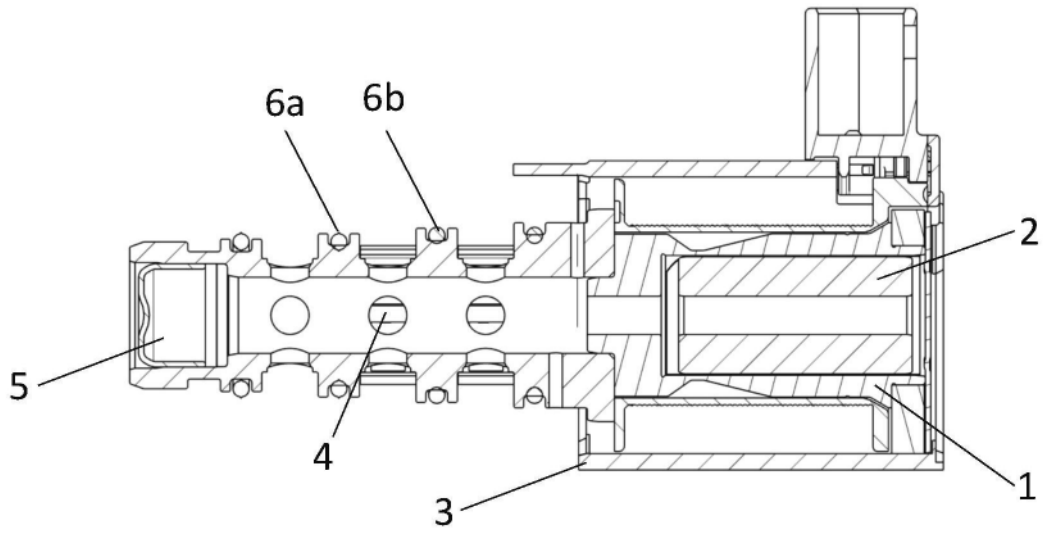


图1a

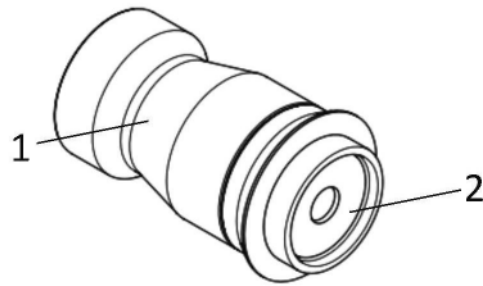


图1b

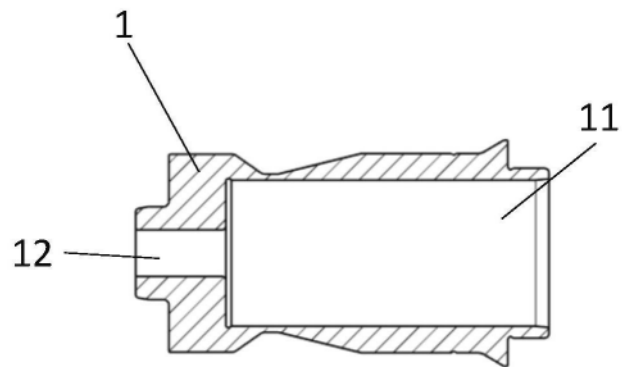


图1c

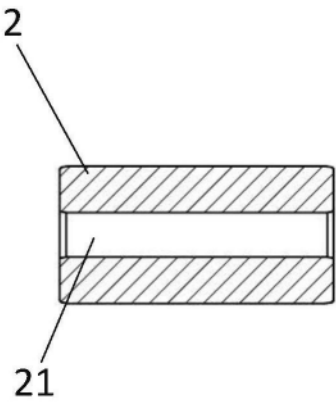


图1d

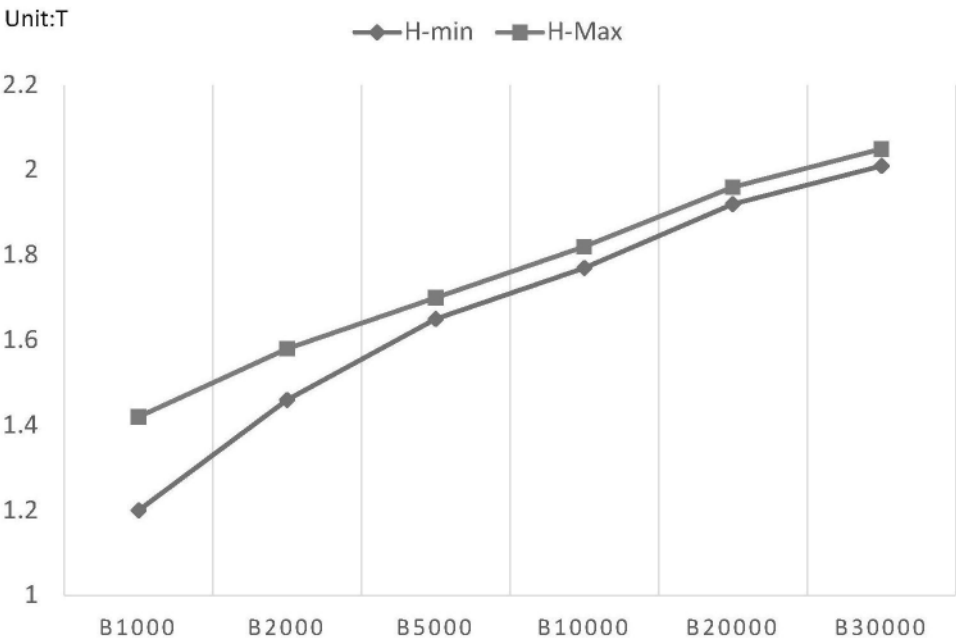


图2