



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109609849 A

(43)申请公布日 2019.04.12

(21)申请号 201811620985.2

G22C 38/24(2006.01)

(22)申请日 2018.12.28

G21D 1/18(2006.01)

G21D 8/02(2006.01)

(71)申请人 西安交通大学

地址 710049 陕西省西安市碑林区咸宁西路28号

(72)发明人 柳文波 王扬中 夏志新 恽迪  
单建强 葛莉 吴攀

(74)专利代理机构 西安智大知识产权代理事务  
所 61215

代理人 何会侠

(51)Int.Cl.

G22C 38/02(2006.01)

G22C 38/04(2006.01)

G22C 38/26(2006.01)

G22C 38/22(2006.01)

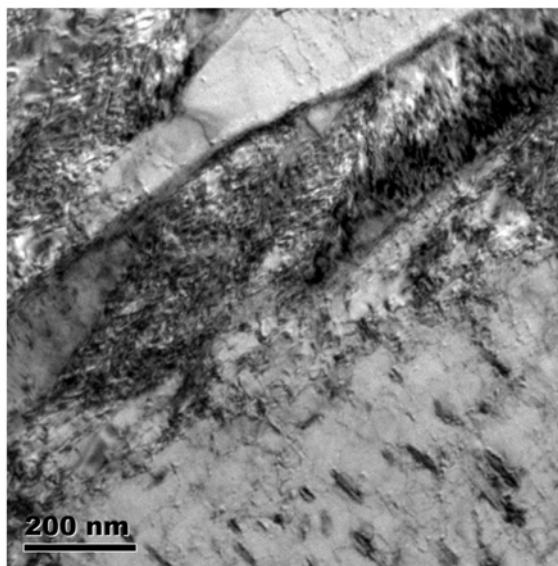
权利要求书1页 说明书5页 附图1页

(54)发明名称

一种含Si低活化马氏体钢及其热处理方法

(57)摘要

本发明提出了一种含Si低活化马氏体钢及其热处理方法,该低活化马氏体钢的合金元素质量占总质量的百分比为: $0.04\% \leq C \leq 0.08\%$ ,  $0.02\% \leq N \leq 0.08\%$ ,  $0.25\% \leq Si \leq 0.65\%$ ,  $0.08\% \leq Ta \leq 0.18\%$ ,  $0.50\% \leq Mn \leq 0.70\%$ ,  $1.40\% \leq W \leq 1.60\%$ ,  $8.5\% \leq Cr \leq 9.5\%$ ,  $0.15\% \leq V \leq 0.35\%$ ,  $0 < 0.005\%$ ,  $P < 0.005\%$ ,  $S < 0.005\%$ ,余量为基体Fe。提高N的含量并适当控制C的含量是为了在后续热处理中形成细小弥散的MX相;引入Si是为了起到固溶强化的作用,并提高其抗氧化腐蚀的能力而不损害其韧性;轧制成型后的低活化马氏体钢板材热处理包括淬火和回火处理;该低活化马氏体钢具有良好的机械性能和抗辐照性能。



1. 一种含Si低活化马氏体钢,其特征在于,该低活化马氏体钢的合金元素质量占总质量的百分比为: $0.04\% \leq C \leq 0.08\%$ ,  $0.02\% \leq N \leq 0.08\%$ ,  $0.25\% \leq Si \leq 0.65\%$ ,  $0.08\% \leq Ta \leq 0.18\%$ ,  $0.50\% \leq Mn \leq 0.70\%$ ,  $1.40\% \leq W \leq 1.60\%$ ,  $8.5\% \leq Cr \leq 9.5\%$ ,  $0.15\% \leq V \leq 0.35\%$ ,  $0 < 0.005\%$ ,  $P < 0.005\%$ ,  $S < 0.005\%$ , 余量为基体Fe;

上述化学成分及重量百分比的钢为Cr-W-V-Ta-Si-N系低活化马氏体钢,其中,0.02%~0.08%的N能够促进回火过程中MX相的析出,并且有助于提高钢在中子辐照环境下的稳定性;0.25%~0.65%的Si能够起到固溶强化的作用,并提高其高温力学性能和抗氧化腐蚀的能力而不损害其韧性;0.04%~0.08%的C能够使钢具有良好的加工性能和抗辐照硬化能力;8.5%~9.5%的Cr能改善钢的抗腐蚀能力并且具有低的辐照硬化能力;0.50%~0.70%的Mn能够保证钢最终获得全马氏体组织;V和Ta为固溶强化和析出强化元素;尽量降低O、P和S的含量有助于提高钢的强韧性并具有低的韧脆转变温度DBTT。

2. 根据权利要求1所述的含Si低活化马氏体钢,其特征在于,所述低活化马氏体钢的合金元素质量占总质量的百分比为:0.055%C,0.058%N,0.28%Si,0.12%Ta,0.50%Mn,1.52%W,8.95%Cr,0.22%V, $0 < 0.005\%$ , $P < 0.005\%$ , $S < 0.005\%$ ,余量为基体Fe。

3. 根据权利要求1所述的含Si低活化马氏体钢,其特征在于,杂质的总质量含量为0.01%以下,其中,所述杂质包含Al、Ni、Mo、Nb、Co和Cu中的至少一种。

4. 权利要求1所述的含Si低活化马氏体钢的热处理方法,其特征在于:对轧制成型后的低活化马氏体钢板材进行淬火和回火处理;轧制成型后的低活化马氏体钢板材淬火处理包括:在1000~1020摄氏度的温度下保温,保温时间为钢锭有效厚度的2~3倍;之后在850~860摄氏度的温度下,将所述钢锭保温,保温时间为钢锭有效厚度的1.5~2倍;以及在空气中,将所述钢锭冷却至室温;淬火后的低活化马氏体钢板材的回火处理包括:在750~760摄氏度的温度下保温,保温时间为钢锭有效厚度的4~5倍;以及在空气中,将所述钢锭冷却至室温;

上述淬火和回火处理中所述的保温时间的单位为毫米,钢锭有效厚度的单位为分钟。

## 一种含Si低活化马氏体钢及其热处理方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及马氏体钢技术领域,具体而言,本发明涉及一种含Si低活化马氏体钢及其热处理方法。

### 背景技术

[0002] 核聚变能被认为是一种几乎用之不尽的“清洁”能源,也是解决未来人类能源问题的重要途径。聚变结构材料问题是制约聚变能实现的关键问题之一。聚变堆包层服役环境极为苛刻,面临高温、高热流密度、高能中子辐照、复杂的机械载荷和高温氧化腐蚀等恶劣的服役条件。与奥氏体钢相比,低活化马氏体钢作为结构部件在辐照条件下其几何尺寸稳定性较好,辐照肿胀率和热膨胀系数较低,热导率和力学性能优异,被认为是发展未来聚变示范堆和聚变动力堆的一种重要结构材料。

[0003] 稳定的回火马氏体板条和细小的析出相是保证长时间高温服役下低活化铁素体钢有良好力学性能的重要因素。在高温长时间服役过程中 $M_{23}C_6$ 碳化物的聚集粗化及组织退化导致高温力学性能的急剧恶化,从而导致材料的失效。

[0004] 因此,为提高低活化马氏体钢的综合性能,有必要开发新的具有优异机械性能和抗辐照性能的低活化马氏体钢。

### 发明内容

[0005] 本发明旨在至少在一定程度上解决上述技术问题,为此,本发明的目的在于提供一种具有良好综合性能的含Si低活化马氏体钢及其热处理方法。

[0006] 为了达到上述目的,本发明采用如下技术方案:

[0007] 一种含Si低活化马氏体钢,该低活化马氏体钢的合金元素质量占总质量的百分比为: $0.04\% \leq C \leq 0.08\%$ ,  $0.02\% \leq N \leq 0.08\%$ ,  $0.25\% \leq Si \leq 0.65\%$ ,  $0.08\% \leq Ta \leq 0.18\%$ ,  $0.50\% \leq Mn \leq 0.70\%$ ,  $1.40\% \leq W \leq 1.60\%$ ,  $8.5\% \leq Cr \leq 9.5\%$ ,  $0.15\% \leq V \leq 0.35\%$ ,  $0 < 0.005\%$ ,  $P < 0.005\%$ ,  $S < 0.005\%$ , 余量为基体Fe。其中,高含量的N能够引入更多的MX(M为金属元素,X为C或者N)相;高含量的Si可以改善低活化马氏体钢的高温力学性能和抗氧化腐蚀行为,从而能够显著提高低活化马氏体钢的综合力学性能。由此,该低活化马氏体钢具有优良的力学性能和抗辐照性能。并且上述低活化马氏体钢中具有适量的C元素,使得C与金属元素形成适量、细小的碳化物,不仅可以提高低活化马氏体钢的综合性能,同时可以避免由于C含量过多在服役过程中生成粗大的 $M_{23}C_6$ 颗粒,导致性能指标恶化。

[0008] 优选地,上述含Si低活化马氏体钢的合金元素质量占总质量的百分比为: $0.055\% C$ ,  $0.058\% N$ ,  $0.28\% Si$ ,  $0.12\% Ta$ ,  $0.50\% Mn$ ,  $1.52\% W$ ,  $8.95\% Cr$ ,  $0.22\% V$ ,  $0 < 0.005\%$ ,  $P < 0.005\%$ ,  $S < 0.005\%$ , 余量为基体Fe。由此可以使得低活化马氏体钢综合性能得到显著提高。

[0009] 优选地,上述含Si低活化马氏体钢的杂质的质量含量为0.01%以下,其中,所述杂质包含Al、Ni、Mo、Nb、Co和Cu中的至少一种。由此将杂质含量控制在0.01重量%以下,可以

避免低活化马氏体钢性能降低。

[0010] 本发明含Si低活化马氏体钢的热处理方法,对轧制成型后的低活化马氏体钢板材进行淬火和回火处理;轧制成型后的低活化马氏体钢板材淬火处理包括:在1000~1020摄氏度的温度下保温,保温时间为钢锭有效厚度的2~3倍;之后在850~860摄氏度的温度下,将所述钢锭保温,保温时间为钢锭有效厚度的1.5~2倍;以及在空气中,将所述钢锭冷却至室温;淬火后的低活化马氏体钢板材的回火处理包括:在750~760摄氏度的温度下保温,保温时间为钢锭有效厚度的4~5倍;以及在空气中,将所述钢锭冷却至室温;

[0011] 上述淬火和回火处理中所述的保温时间的单位为毫米,钢锭有效厚度的单位为分钟。

[0012] 由此,上述中间温度保温热处理能够抑制 $M_{23}C_6$ 相析出,同时保证MX相的充分析出,通过采用上述热处理工艺可以进一步提高低活化马氏体钢的力学性能和抗辐照性能。

[0013] 本发明的附加方面和优点将在下面的描述中部分给出,部分将从下面的描述中变得明显,或通过本发明的实践了解到。

## 附图说明

[0014] 图1为本发明一个实施例的低活化马氏体钢的组织形貌。

## 具体实施方式

[0015] 下面详细描述本发明的实施例,所述实施例的示例在附图中示出,下面通过参考附图描述的实施例是示例性的,旨在用于解释本发明,而不能理解为对本发明的限制。

[0016] 一方面本发明提出了一种含Si低活化马氏体钢,该低活化马氏体钢的合金元素质量占总质量的百分比为: $0.04\% \leq C \leq 0.08\%$ ,  $0.02\% \leq N \leq 0.08\%$ ,  $0.25\% \leq Si \leq 0.65\%$ ,  $0.08\% \leq Ta \leq 0.18\%$ ,  $0.50\% \leq Mn \leq 0.70\%$ ,  $1.40\% \leq W \leq 1.60\%$ ,  $8.5\% \leq Cr \leq 9.5\%$ ,  $0.15\% \leq V \leq 0.35\%$ ,  $0 < 0.005\%$ ,  $P < 0.005\%$ ,  $S < 0.005\%$ , 余量为基体Fe。

[0017] 由此根据本发明的实施例提出了一种新的组分和配比的低活化马氏体钢,其中,高含量的N能够引入更多的MX相,高含量的Si可以改善低活化马氏体钢的高温力学性能和抗氧化腐蚀行为,从而能够显著提高低活化马氏体钢的综合力学性能。

[0018] 根据本发明的具体实施例,上述组分中的主要合金元素在低活化马氏体钢中的作用如下:

[0019] 氮(N):本发明实施例的低活化马氏体钢中N的含量为0.02~0.08重量%,N是MX(X为C或者N)相形成的主要元素,由于本发明实施例的低活化马氏体钢中含有大量的MX相形成元素(Ta,V,W)。N含量的提高可以弥补C元素在MX相形成方面的量。

[0020] 碳(C):C为奥氏体形成元素,间隙原子,可以与金属元素形成碳化物,提高低活化马氏体钢的力学性能,但是C元素含量过高则会在服役过程中生成粗大的 $M_{23}C_6$ 颗粒,导致性能指标恶化。因此C元素的含量、甚至含量的细小差别都会对低活化马氏体钢的性能产生较大影响,例如影响低活化马氏体钢的抗辐照脆性。由于本发明实施例的低活化马氏体钢中包含的C为0.04~0.08重量%,由此可以避免粗大的 $M_{23}C_6$ 颗粒的生成,从而使得低活化马氏体钢具有了良好的抗辐射性能。

[0021] 硅(Si):本发明实施例的低活化马氏体钢中Si的含量为0.25~0.65重量%,Si为

钢中的固溶强化元素。钢铁材料中的Si能显著改善其抗氧化性能和抗液态铅铋腐蚀能力。并且本发明实施例低活化马氏体钢中含有的Si可以改善低活化马氏体的抗腐蚀能力,由此使得低活化马氏体钢具有了良好的机械性能。

[0022] 作为本发明的优选实施方式,上述低活化马氏体钢的合金元素质量占总质量的百分比为:0.055%C,0.058%N,0.28%Si,0.12%Ta,0.50%Mn,1.52%W,8.95%Cr,0.22%V,0<0.005%,P<0.005%,S<0.005%,余量为基体Fe。由此上述低活化马氏体钢中具有高含量的N和Si元素,使得低活化马氏体钢中具有更多细小的MX类型的碳化物,由此该低活化马氏体钢具有优良的力学性能和抗辐照性能。并且上述低活化马氏体钢中具有适量的C元素,使得C与金属元素形成适量、细小的碳化物,不仅可以提高低活化马氏体钢的综合性能,同时可以避免由于C含量过多在服役过程中生成粗大的 $M_{23}C_6$ 颗粒,导致性能指标恶化。

[0023] 根据本发明的再一个优选实施方式,含Si低活化马氏体钢的杂质的含量在0.01重量%以下,由此可以进一步提高低活化马氏体钢的综合性能,其中,杂质包含Al、Ni、Mo、Nb、Co和Cu的至少一种。

[0024] 针对低活化马氏体钢的力学性能问题,本发明实施例制备低活化马氏体钢的方法通过引入硅(Si)并提高氮(N)的含量,设计提出一种新成分的低活化马氏体钢的成分,进而改善其力学性能和抗辐照性能。N和C是形成MX相的主要元素之一,本发明采用高N的成分设计,能够从成分设计上能够引入更多细小的MX类型碳化物。能够制备得到具有良好综合性能的低活化马氏体钢,例如可以显著提高低活化马氏体钢的抗冲击性能、高温蠕变性能以及抗辐照性能等。

[0025] 本发明通过采用上述组分可以显著提高制备得到的低活化马氏体钢的综合性能,进一步地,本发明的发明人还进一步地对制备低活化马氏体钢的方法中的热处理方法进行了优化,以便进一步提高制备得到低活化马氏体钢的综合性能。

[0026] 为此,另一方面本发明还提出了含Si低活化马氏体钢的热处理方法,对轧制成型后的低活化马氏体钢板材进行淬火和回火处理;根据本发明的一个实施例,轧制成型后的低活化马氏体钢板材淬火处理包括:在1000~1020摄氏度的温度下保温,保温时间为钢锭有效厚度的2倍至3倍之间;在850~860摄氏度的温度下保温,保温时间为钢锭有效厚度的1.5倍至2倍之间;以及在空气中,将钢锭冷却至室温。根据本发明的具体实施例,钢锭有效厚度的定义参见GB/T 7232-1999,本发明实施例中钢锭有效厚度的单位为毫米,保温时间的单位为分钟。

[0027] 根据本发明的一个实施例,上述方法中的回火处理包括:在750~760摄氏度的温度下保温,保温时间为钢锭有效厚度的4倍至5倍之间;以及在空气中,将钢锭冷却至室温。

[0028] 具有较大尺寸的 $M_{23}C_6$ 碳化物的粗化是引起低活化马氏体钢失效的一个主要原因。而MX相的析出温度明显高于 $M_{23}C_6$ 的析出温度,可以在奥氏体化后找到一个中间温度保温处理,在抑制 $M_{23}C_6$ 相析出的同时让MX相能充分析出。由于MX相的粗化长大速率远远小于 $M_{23}C_6$ 的粗化长大速率,此外V等强碳化物形成元素在基体中固溶度很低,因此经过中间温度保温后基体中有大量细小弥散的MX相。从而改善了低活化马氏体钢的综合力学性能。

[0029] 为此,根据本发明的再一个实施例,上述制备低活化马氏体钢的方法中,在淬火处理与回火处理之间进行中间热处理,具体包括:在850~860摄氏度的温度下,将经过固溶处理的所述钢锭进行保温,该保温的时间为所述钢锭有效厚度的1.5~2倍。由此,上述中间温

度保温热处理能够抑制 $M_{23}C_6$ 相析出,同时保证MX相的充分析出,通过采用上述热处理工艺可以进一步提高低活化马氏体钢的力学性能和抗辐照性能。

[0030] 针对低活化马氏体钢的力学性能问题,本发明通过提高硅(Si)含量和引入氮(N)含量提出一种新成分的低活化马氏体钢的成分及其热处理工艺,该钢种具有良好的力学性能和抗辐照性能。N和C是形成MX相的主要元素,本发明采用高N的成分设计,同时提高两个元素的含量,从成分设计上能够引入更多细小的MX类型碳化物。中间温度保温热处理能在抑制 $M_{23}C_6$ 相析出的同时保证MX相的充分析出,从热处理工艺上进一步保证该钢种具有优良的力学性能和抗辐照性能。本发明实施例的制备低活化马氏体钢的方法可重复性高,由此可以实现大规模工业化生产。

[0031] 下面参考具体实施例,对本发明进行描述,需要说明的是,这些实施例仅仅是描述性的,而不以任何方式限制本发明。

[0032] 实施例1(成分设计对性能的影响)

[0033] 采用本发明的成分制备出了合格的低活化马氏体钢,该低活化马氏体钢的合金元素质量占总质量的百分比为:0.055%C,0.058%N,0.28%Si,0.12%Ta,0.50%Mn,1.52%W,8.95%Cr,0.22%V,0<0.005%,P<0.005%,S<0.005%,余量为基体Fe。将上述成分原料经过铸造、锻压、轧制成16毫米的钢板(其有效厚度为16)之后,采用如下的热处理工艺:在1015摄氏度的炉子里保温45分钟,随后移至另一个温度为855摄氏度的炉子里保温30分钟,空冷至室温;随后加热至755摄氏度回火75分钟,空冷至室温。

[0034] 评价指标:

[0035] 上述实施例方法制备得到的低活化马氏体钢的组织形貌图见图1。

[0036] 测定其常温力学性能,测定方法依据GB/T228-2002和GB/T229-2007。

[0037] 测定结果:

[0038] 1、抗拉强度657MPa;

[0039] 2、屈服强度531MPa;

[0040] 3、断后伸长率23%;

[0041] 4、断面收缩率71%

[0042] 4、冲击功239J。

[0043] 与已经公开报道的聚变堆用的低活化马氏体钢的性能相比,本发明设计的新成分的钢种具有优异的强韧性。

[0044] 实施例2(新型热处理方法对高温蠕变性能的影响)

[0045] 试样2:所述原料的合金元素质量占总质量的百分比为:0.046%C,0.062%N,0.35%Si,0.09%Ta,0.55%Mn,1.49%W,9.15%Cr,0.19%V,0<0.005%,P<0.005%,S<0.005%,余量为基体Fe。将上述成分原料经过铸造、锻压、轧制成16毫米的钢板(其有效厚度为16)之后,采用如下的热处理工艺:在1010摄氏度下保温45分钟,随后空冷至室温;随后加热至755摄氏度回火75分钟,空冷至室温。最终制备得到试样2。

[0046] 高温蠕变力学性能测定:

[0047] 实验条件:550摄氏度,270MPa。具体实验方法根据GB/T2039-2012执行。

[0048] 测定结果:实验36小时后的塑性伸长率为3.25%;

[0049] 由此,采用本发明实施例方法制备的低活化马氏体钢具有较好的高温蠕变性能,

中间保温热处理更能进一步提高该合金钢的高温蠕变性能。

[0050] 实施例3(新型热处理方法对高温拉伸性能的影响)

[0051] 试样3:所述原料的合金元素质量占总质量的百分比为:0.061%C,0.036%N,0.49%Si,0.11%Ta,0.52%Mn,1.54%W,8.51%Cr,0.24%V,0<0.005%,P<0.005%,S<0.005%,余量为基体Fe。将上述成分原料经过铸造、锻压、轧制成16毫米的钢板(其有效厚度为16)之后,采用如下的热处理工艺:在1015摄氏度下保温45分钟,随后空冷至室温;随后加热至755摄氏度回火75分钟,空冷至室温。最终制备得到试样3。

[0052] 高温力学性能测定:

[0053] 实验条件:550摄氏度力学性能测试。具体实验方法根据GB/T2039-2012执行。

[0054] 1、抗拉强度539MPa;

[0055] 2、断后伸长率34%;

[0056] 由此,采用本发明实施例方法制备的低活化马氏体钢具有较好的高温力学性能,新型热处理工艺更能进一步提高该合金钢的高温力学性能。

[0057] 在本说明书的描述中,参考术语“一个实施例”、“一些实施例”、“示例”、“具体示例”、或“一些示例”等的描述意指结合该实施例或示例描述的具体特征、结构、材料或者特点包含于本发明的至少一个实施例或示例中。在本说明书中,对上述术语的示意性表述不一定指的是相同的实施例或示例。而且,描述的具体特征、结构、材料或者特点可以在任何一个或多个实施例或示例中以合适的方式结合。

[0058] 尽管上面已经示出和描述了本发明的实施例,可以理解的是,上述实施例是示例性的,不能理解为对本发明的限制,本领域的普通技术人员在不脱离本发明的原理和宗旨的情况下在本发明的范围内可以对上述实施例进行变化、修改、替换和变型。

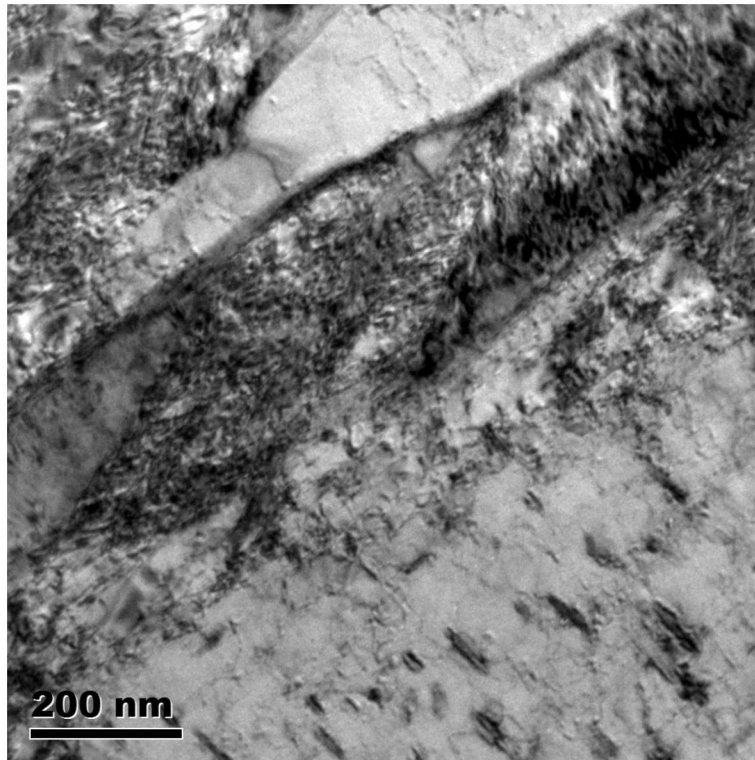


图1