



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114855092 A

(43) 申请公布日 2022. 08. 05

(21) 申请号 202210781652.8

B33Y 70/00 (2020.01)

(22) 申请日 2022.07.05

G21D 6/00 (2006.01)

G22C 33/02 (2006.01)

(71) 申请人 北京科技大学

地址 100083 北京市海淀区学院路30号

(72) 发明人 董超芳 王力 孔德成 张世元

纪毓成 李晓刚

(74) 专利代理机构 深圳峰诚志合知识产权代理

有限公司 44525

专利代理师 张腾

(51) Int. Cl.

G22C 38/02 (2006.01)

G22C 38/04 (2006.01)

G22C 38/42 (2006.01)

G22C 38/48 (2006.01)

B33Y 40/20 (2020.01)

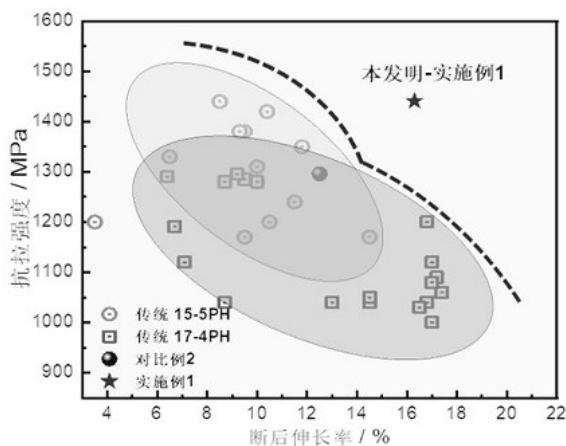
权利要求书1页 说明书7页 附图3页

(54) 发明名称

一种增材制造高强韧不锈钢及其制备工艺

(57) 摘要

本发明属于金属材料增材制造技术领域,具体为一种增材制造高强韧不锈钢及其制备工艺,能够打破了同等成分传统马氏体不锈钢强塑性的倒置矛盾,实现高强度和高塑性同时提高。本发明首先建立了增材制造不同合金成分与相组成的关系相图,之后通过合金成分设计,优化奥氏体形成元素含量,将新型合金成分优化于马氏体奥氏体双相区,最终借助增材制造制备周期性分布的异质结构马氏体不锈钢,屈服强度≥1270MPa,抗拉强度≥1380MPa,断后伸长率≥15%。



1. 一种增材制造高强韧不锈钢,其特征在於,按重量百分比计,其成分为, $C \leq 0.05\text{wt}\%$ 、 $Si \leq 1\text{wt}\%$ 、 $Mn \leq 1\text{wt}\%$ 、 $Cr$  14.5-15.5wt%、 $Ni$  5.0-5.5wt%、 $Cu$  4-4.5wt%、 $Nb$  0.35-0.45wt%,余量为Fe和不可避免的杂质,

且Cr当量 $Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 2.2\%Ti + 0.7\%Nb + 2.48\%Al$ ,

Ni当量 $Ni_{eq} = \%Ni + 35\%C + 20\%N + 0.25\%Cu$ ,

所述高强韧不锈钢的屈服强度 $\geq 1270\text{MPa}$ ,抗拉强度 $\geq 1380\text{MPa}$ ,断后伸长率 $\geq 15\%$ 。

2. 根据权利要求1所述的一种增材制造高强韧不锈钢,其特征在於,所述Cr当量 $Cr_{eq}$ 为13.8-15.4,所述Ni当量 $Ni_{eq}$ 为7.5-8.8。

3. 一种增材制造高强韧不锈钢,其特征在於,所述高强韧不锈钢显微组织包括分布于熔池底部的大块奥氏体和形成于马氏体板条间的薄膜奥氏体,细小的马氏体板条基体中析出高密度纳米级多重析出相。

4. 根据权利要求1-3任一项所述的一种增材制造高强韧不锈钢,其特征在於,所述高强韧不锈钢的屈服强度 $\geq 1300\text{MPa}$ ,抗拉强度 $\geq 1440\text{MPa}$ ,断后伸长率 $\geq 16\%$ 。

5. 一种增材制造高强韧不锈钢的制备工艺,其特征在於,包括如下步骤:

S1、取权利要求1-2任一项所述不锈钢成分的不锈钢粉末备用;

S2、将步骤S1所述粉末采用3D打印工艺进行打印形成打印产品;

S3、对步骤S2形成的打印产品进行热处理。

6. 根据权利要求5所述的一种增材制造高强韧不锈钢的制备工艺,其特征在於,所述步骤S1中,所述不锈钢粉末粒径为15-45 $\mu\text{m}$ 。

7. 根据权利要求5所述的一种增材制造高强韧不锈钢的制备工艺,其特征在於,所述步骤S2中,所述3D打印工艺的参数为:光斑直径100-300 $\mu\text{m}$ ,扫描功率230-400W,扫描间距0.07-0.10mm,扫描速度550-900mm/s,铺粉厚度0.02-0.04mm。

8. 根据权利要求5所述的一种增材制造高强韧不锈钢的制备工艺,其特征在於,所述步骤S2中,所述3D打印工艺的保护气氛为氮气。

9. 根据权利要求5所述的一种增材制造高强韧不锈钢的制备工艺,其特征在於,所述步骤S2中,所述打印产品致密度 $\geq 97\%$ 。

10. 根据权利要求5所述的一种增材制造高强韧不锈钢的制备工艺,其特征在於,所述步骤S3中,所述热处理的升温速率为6-10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,直至升温到450-500 $^{\circ}\text{C}$ ,保温2-10h。

## 一种增材制造高强韧不锈钢及其制备工艺

### 技术领域

[0001] 本发明涉及金属材料增材制造技术领域,具体为一种增材制造高强韧不锈钢及其制备工艺。

[0002]

### 背景技术

[0003] 随着航空航天及海洋工程的迅猛发展,装备结构件越来越复杂,服役环境逐渐恶劣,高性能高强度不锈钢部件需求越来越多。高强度马氏体不锈钢服役性能与显微组织密切相关,其较高的强度主要来源于马氏体基体的超高密度位错和纳米级析出相。其塑性主要通过改善奥氏体分布及含量不断优化。然而,其强度和塑性的任一提高会导致另一性能的下降,称之强塑性倒置矛盾。所以需要借助新型制备工艺优化其显微组织及服役性能。

[0004] 增材制造技术(也称3D打印)作为近年来快速发展的新兴工艺,可以快速、精准制造复杂结构件,简化工序、节约材料,大幅度缩短材料研发周期,可以实现传统工艺难以或无法加工的复杂结构的制造。增材制造具有高激光能量、快速冷却及多道次循环热处理等特点,因此,增材制造不锈钢存在明显熔池结构,制备后结构件存在应力分布不均匀、多界面及细小组织等特点。

[0005] 目前打印后的高强度不锈钢显微组织较为细小,存在纳米级氧化物夹杂,部分存在明显的熔池界面。拉伸实验表明其力学性能可与传统制造马氏体不锈钢相媲美。但是显微组织相分布与传统制备工艺同一成分马氏体不锈钢存在明显差别。因此,开发组织可控的且同步提升强韧性的不锈钢具有重大的意义。

[0006]

### 发明内容

[0007] 本发明的主要目的是提出一种增材制造高强韧不锈钢及其制备工艺,克服现有技术中强塑性倒置矛盾的关系,通过优化合金成分,针对增材制造不锈钢建立合金成分和组织结构的相图关系,借助增材制造快速冷却及高能激光等特点,制备出微纳米级多尺度-多重异质结构高强韧马氏体不锈钢,该增材制造异质结构马氏体不锈钢强度和断后延伸率均明显高于传统制造类似成分的不锈钢。

[0008] 为解决上述技术问题,根据本发明的一个方面,本发明提供了如下技术方案:

一种增材制造高强韧不锈钢,按重量百分比计,其成分为, $C \leq 0.05\text{wt}\%$ 、 $Si \leq 1\text{wt}\%$ 、 $Mn \leq 1\text{wt}\%$ 、 $Cr 14.5-15.5\text{wt}\%$ 、 $Ni 5.0-5.5\text{wt}\%$ 、 $Cu 4-4.5\text{wt}\%$ 、 $Nb 0.35-0.45\text{wt}\%$ ,余量为Fe和不可避免的杂质,

且Cr当量 $Cr_{eq} = Cr + \%Mo + 2.2\%Ti + 0.7\%Nb + 2.48\%Al$ ,

Ni当量 $Ni_{eq} = \%Ni + 35\%C + 20\%N + 0.25\%Cu$ ,

所述高强韧不锈钢的屈服强度 $\geq 1270 \text{ MPa}$ ,抗拉强度 $\geq 1380\text{MPa}$ ,断后伸长率 $\geq 15\%$ 。

[0009] 所述高强韧不锈钢显微组织包括分布于熔池底部的大块奥氏体和形成于马氏体板条间的薄膜奥氏体,细小的马氏体板条基体中析出高密度纳米级多重析出相。分布于熔池底部的大块奥氏体和形成于马氏体板条间的薄膜奥氏体提高了不锈钢的塑韧性,细小的马氏体板条基体中析出高密度纳米级多重析出相进一步提高了不锈钢的抗拉强度。

[0010] 作为本发明所述的一种增材制造高强韧不锈钢的优选方案,其中:所述Cr当量 $Cr_{eq}$ 为13.8-15.4,所述Ni当量 $Ni_{eq}$ 为7.5-8.8。更优选的,所述Cr当量 $Cr_{eq}$ 为14.5-15.0,所述Ni当量 $Ni_{eq}$ 为7.8-8.4。

[0011] 作为本发明所述的一种增材制造高强韧不锈钢的优选方案,其中:所述高强韧不锈钢的屈服强度 $\geq 1300\text{MPa}$ ,抗拉强度 $\geq 1440\text{MPa}$ ,断后伸长率 $\geq 16\%$ 。

[0012] 为解决上述技术问题,根据本发明的另一个方面,本发明提供了如下技术方案:

一种增材制造高强韧不锈钢的制备工艺,包括如下步骤:

S1、取上述成分的不锈钢粉末备用;

S2、将步骤S1所述粉末采用3D打印工艺进行打印形成打印产品;

S3、对步骤S2形成的打印产品进行热处理。

[0013] 作为本发明所述的一种增材制造高强韧不锈钢的制备工艺的优选方案,其中:所述步骤S1中,所述不锈钢粉末粒径为15-45  $\mu\text{m}$ 。

[0014] 作为本发明所述的一种增材制造高强韧不锈钢的制备工艺的优选方案,其中:所述步骤S2中,所述3D打印工艺的参数为:光斑直径为100-300  $\mu\text{m}$ ,扫描功率为230-400 W,扫描间距为0.07-0.10 mm,扫描速度为550-900 mm/s,铺粉厚度为0.02-0.04 mm;所述打印产品致密度可达97%以上。

[0015] 作为本发明所述的一种增材制造高强韧不锈钢的制备工艺的优选方案,其中:所述步骤S3中,所述热处理的升温速率为6-10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,直至升温到450-500 $^{\circ}\text{C}$ ,保温2-10h。

[0016] 本发明的有益效果如下:

本发明提出一种增材制造高强韧不锈钢及其制备工艺,首先建立了增材制造不同合金成分与相组成的关系相图,之后通过合金成分设计,优化奥氏体形成元素含量,将新型合金成分优化于马氏体奥氏体双相区,最终借助增材制造制备周期性分布的异质结构马氏体不锈钢,屈服强度 $\geq 1270\text{MPa}$ ,抗拉强度 $\geq 1380\text{MPa}$ ,断后伸长率 $\geq 15\%$ 。与传统类似成分马氏体不锈钢材料相比,高强度和高塑性同时提高,打破了同等成分传统马氏体不锈钢强塑性的倒置矛盾。

[0017]

## 附图说明

[0018] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图示出的结构获得其他的附图。

[0019] 图1为本发明增材制造高强韧不锈钢相组成与Cr当量和Ni当量的关系;

图2为本发明实施例1不锈钢显微组织;

图3为本发明各实施例和对比例不锈钢室温拉伸测试图;

图4为本发明实施例1和对比例2强韧性关系图。

[0020] 本发明目的的实现、功能特点及优点将结合实施例,参照附图做进一步说明。

[0021]

### 具体实施方式

[0022] 下面将结合实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅是本发明的一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有作出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0023] 本发明提供一种增材制造高强韧不锈钢及其制备工艺,能够打破了同等成分传统马氏体不锈钢强塑性的倒置矛盾,实现高强度和高塑性同时提高;首先建立了增材制造不同合金成分与相组成的关系相图,之后通过合金成分设计,优化奥氏体形成元素含量,将新型合金成分优化于马氏体奥氏体双相区,最终借助增材制造制备周期性分布的异质结构马氏体不锈钢,屈服强度 $\geq 1270\text{MPa}$ ,抗拉强度 $\geq 1380\text{MPa}$ ,断后伸长率 $\geq 15\%$ 。

[0024] 根据本发明的一个方面,本发明提供了如下技术方案:

一种增材制造高强韧不锈钢,按重量百分比计,其成分为,C $\leq 0.05\text{wt}\%$ 、Si $\leq 1\text{wt}\%$ 、Mn $\leq 1\text{wt}\%$ 、Cr 14.5-15.5wt%、Ni 5.0-5.5wt%、Cu 4-4.5wt%、Nb 0.35-0.45wt%,余量为Fe和不可避免的杂质。

[0025] 其中,Cr当量 $\text{Cr}_{\text{eq}} = \text{Cr} + \text{Mo} + 2.2\% \text{Ti} + 0.7\% \text{Nb} + 2.48\% \text{Al}$ ,

Ni当量 $\text{Ni}_{\text{eq}} = \text{Ni} + 35\% \text{C} + 20\% \text{N} + 0.25\% \text{Cu}$ ,

所述Cr当量 $\text{Cr}_{\text{eq}}$ 为13.8-15.4,所述Ni当量 $\text{Ni}_{\text{eq}}$ 为7.5-8.8。更优选的,所述Cr当量 $\text{Cr}_{\text{eq}}$ 为14.5-15.0,所述Ni当量 $\text{Ni}_{\text{eq}}$ 为7.8-8.4。

[0026] 具体的,所述Cr当量 $\text{Cr}_{\text{eq}}$ 为例,但不限于14.5、14.6、14.7、14.8、14.9、15.0中的任意一者或任意两者之间的范围;具体的,所述Ni当量 $\text{Ni}_{\text{eq}}$ 为例如但不限于7.8、7.9、8.0、8.1、8.2、8.3、8.4中的任意一者或任意两者之间的范围。

[0027] 本发明相比于原有类似成分15-5PH不锈钢,基于对不锈钢相组成的形成机理的研究,对奥氏体形成元素进行优化,本发明不锈钢具有更高含量的Ni和Cu元素,从而获得较高的Ni当量 $\text{Ni}_{\text{eq}}$ ,使得该合金成分不锈钢由增材制造不锈钢相图马氏体区域右移至马氏体-奥氏体双相区,以便获得周期性分布的奥氏体异质结构马氏体不锈钢。同时,该成分中Cr、Ni、Nb和Cu配比的主体化学成分设计可以满足高密度析出相的形成,从而同步提高其强塑性。

[0028] 所述高强韧不锈钢显微组织包括分布于熔池底部的大块奥氏体和形成于马氏体板条间的薄膜奥氏体,细小的马氏体板条基体中析出高密度纳米级多重析出相。分布于熔池底部的大块奥氏体和形成于马氏体板条间的薄膜奥氏体提高了不锈钢的塑韧性,细小的马氏体板条基体中析出高密度纳米级多重析出相进一步提高了不锈钢的抗拉强度。

[0029] 所述增材制造高强韧不锈钢显微组织基体主要为马氏体,其中包含20%以上奥氏体;所述高密度纳米级多重析出相的尺寸为1-3nm,平均尺寸为1.5nm左右。

[0030] 所述高强韧不锈钢的屈服强度 $\geq 1270\text{MPa}$ ,抗拉强度 $\geq 1380\text{MPa}$ ,断后伸长率 $\geq 15\%$ ;优选地,所述高强韧不锈钢的屈服强度 $\geq 1300\text{MPa}$ ,抗拉强度 $\geq 1440\text{MPa}$ ,断后伸长率 $\geq 16\%$ 。

[0031] 根据本发明的另一个方面,本发明提供了如下技术方案:

一种增材制造高强韧不锈钢的制备工艺,包括如下步骤:

S1、取上述成分的不锈钢粉末备用;

S2、将步骤S1所述粉末采用3D打印工艺进行打印形成打印产品;

S3、对步骤S2形成的打印产品进行热处理。

[0032] 本发明针对增材制造不锈钢建立合金成分和组织结构的相图关系,通过优化合金成分,借助增材制造快速冷却及高能激光等特点,制备出微纳米级多尺度-多重异质结构高强韧不锈钢,该增材制造异质结构不锈钢强度和断后延伸率均明显高于传统制造类似成分的不锈钢。

[0033] 所述不锈钢粉末粒径为15-45 $\mu\text{m}$ ,具体的,所述不锈钢粉末粒径为例如但不限于15 $\mu\text{m}$ 、20 $\mu\text{m}$ 、25 $\mu\text{m}$ 、30 $\mu\text{m}$ 、35 $\mu\text{m}$ 、40 $\mu\text{m}$ 、45 $\mu\text{m}$ 的任意两者之间的范围;所述不锈钢粉末为无空心粉,球形度 $\geq 95\%$ 以上,未检测到夹杂物,所述粉末粒径分布为:D10:19.3%,D50:30.9%,D90:49.2%。

[0034] 所述3D打印工艺的参数为:光斑直径100-300 $\mu\text{m}$ ,扫描功率230-400W,扫描间距0.07-0.10mm,扫描速度550-900mm/s,铺粉厚度0.02-0.04mm,保护气氛为氮气;所述打印产品致密度可达97%以上。

[0035] 所述3D打印工艺参数可以根据打印的原料粒径和组成进行调整,具体的,所述光斑直径为例如但不限于100 $\mu\text{m}$ 、150 $\mu\text{m}$ 、200 $\mu\text{m}$ 、250 $\mu\text{m}$ 、300 $\mu\text{m}$ 中的任意一者或任意两者之间的范围;所述扫描功率为例如但不限于230W、250W、300W、300W、400W中的任意一者或任意两者之间的范围;所述扫描间距为例如但不限于0.07mm、0.08mm、0.09mm、0.10mm中的任意一者或任意两者之间的范围;所述扫描速度为例如但不限于550mm/s、600mm/s、650mm/s、700mm/s、750mm/s、800mm/s、850mm/s、900mm/s中的任意一者或任意两者之间的范围;所述铺粉厚度为例如但不限于0.02mm、0.025mm、0.03mm、0.035mm、0.04mm中的任意一者或任意两者之间的范围。

[0036] 所述热处理的升温速率为6-10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,直至升温到450-500 $^{\circ}\text{C}$ ,保温2-10h。所述热处理工艺参数可以根据打印的原料组成进行调整,具体的,所述升温速率为例如但不限于6 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、7 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、8 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、9 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 中的任意一者或任意两者之间的范围;所述热处理温度为例如但不限于450 $^{\circ}\text{C}$ 、460 $^{\circ}\text{C}$ 、470 $^{\circ}\text{C}$ 、480 $^{\circ}\text{C}$ 、490 $^{\circ}\text{C}$ 、500 $^{\circ}\text{C}$ 中的任意一者或任意两者之间的范围;所述保温时间为例如但不限于2h、3h、4h、5h、6h、7h、8h、9h、10h。

[0037] 实施例1

一种增材制造高强韧不锈钢,采用如下制备工艺:

S1、取不锈钢粉末备用:

粉末成分为C: 0.044 wt%, Si: 0.58 wt%, Mn: 0.46 wt%, Cr: 14.73 wt%, Ni: 5.01 wt%, Cu: 4.01 wt%, Nb: 0.385 wt%。余者为Fe和不可避免的杂质元素。粉末粒径为15-45 $\mu\text{m}$ ,平均直径21.81 $\mu\text{m}$ ,无空心粉,球形度95%以上,未检测到夹杂物,氧含量为186 ppm;

S2、将步骤S1所述粉末采用3D打印工艺进行打印形成打印产品:

3D打印工艺的光斑直径为100 $\mu\text{m}$ ,扫描功率为230 W,扫描间距为0.10 mm,扫描速度为886 mm/s,铺粉厚度为0.02 mm,保护气氛为氮气,所述打印产品致密度为98.5%;

3. 对步骤S2形成的打印产品进行热处理:

所述热处理在马弗炉中进行,热处理的升温速率为8 °C/min,直至升温到500°C,保温4h。

#### [0038] 实施例2

一种增材制造高强韧不锈钢,采用如下制备工艺:

S1、取不锈钢粉末备用:

粉末成分为C: 0.044 wt%, Si: 0.58 wt%, Mn: 0.46 wt%,Cr: 14.73 wt%, Ni: 5.01 wt%,Cu: 4.01 wt%,Nb:0.385 wt%。余者为Fe和不可避免的杂质元素。粉末粒径为15-45 μm,平均直径21.81 μm,无空心粉,球形度95%以上,未检测到夹杂物,氧含量为186 ppm;

S2、将步骤S1所述粉末采用3D打印工艺进行打印形成打印产品:

3D打印工艺的光斑直径为100μm,扫描功率为260 W,扫描间距为0.10 mm,扫描速度为550 mm/s,铺粉厚度为0.02 mm,保护气氛为氮气,所述打印产品致密度为99.2%;

3.对步骤S2形成的打印产品进行热处理:

所述热处理在马弗炉中进行,热处理的升温速率为8 °C/min,直至升温到500°C,保温4h。

#### [0039] 实施例3

一种增材制造高强韧不锈钢,采用如下制备工艺:

S1、取不锈钢粉末备用:

粉末成分为C: 0.044 wt%, Si: 0.58 wt%, Mn: 0.46 wt%,Cr: 14.73 wt%, Ni: 5.01 wt%,Cu: 4.01 wt%,Nb:0.385 wt%。余者为Fe和不可避免的杂质元素。粉末粒径为15-45 μm,平均直径21.81 μm,无空心粉,球形度95%以上,未检测到夹杂物,氧含量为186 ppm;

S2、将步骤S1所述粉末采用3D打印工艺进行打印形成打印产品:

3D打印工艺的光斑直径为100μm,扫描功率为260 W,扫描间距为0.10 mm,扫描速度为550 mm/s,铺粉厚度为0.02 mm,保护气氛为氮气,所述打印产品致密度为99.2%;

3.对步骤S2形成的打印产品进行热处理:

所述热处理在马弗炉中进行,热处理的升温速率为8 °C/min,直至升温到480°C,保温4h。

#### [0040] 实施例4

一种增材制造高强韧不锈钢,采用如下制备工艺:

S1、取不锈钢粉末备用:

粉末成分为C: 0.044 wt%, Si: 0.58 wt%, Mn: 0.46 wt%,Cr: 14.53 wt%, Ni: 5.13 wt%,Cu: 3.85 wt%,Nb:0.325 wt%。余者为Fe和不可避免的杂质元素。粉末粒径为15-45 μm,平均直径21.81 μm,无空心粉,球形度95%以上,未检测到夹杂物,氧含量为186 ppm;

S2、将步骤S1所述粉末采用3D打印工艺进行打印形成打印产品:

3D打印工艺的光斑直径为100μm,扫描功率为260 W,扫描间距为0.10 mm,扫描速度为550 mm/s,铺粉厚度为0.02 mm,保护气氛为氮气,所述打印产品致密度为99.3%;

3.对步骤S2形成的打印产品进行热处理:

所述热处理在马弗炉中进行,热处理的升温速率为8 °C/min,直至升温到480°C,保温4h。

#### [0041] 对比例1

与实施例1不同之处在于,对比例1不进行热处理,具体工艺如下:

一种增材制造高强韧不锈钢,采用如下制备工艺:

S1、取不锈钢粉末备用:

粉末成分为C: 0.044 wt%, Si: 0.58 wt%, Mn: 0.46 wt%, Cr: 14.73 wt%, Ni: 5.01 wt%, Cu: 4.01 wt%, Nb: 0.385 wt%。余者为Fe和不可避免的杂质元素。粉末粒径为15-45  $\mu\text{m}$ , 平均直径21.81  $\mu\text{m}$ , 无空心粉, 球形度95%以上, 未检测到夹杂物, 氧含量为186 ppm;

S2、将步骤S1所述粉末采用3D打印工艺进行打印形成打印产品:

3D打印工艺的光斑直径为100 $\mu\text{m}$ , 扫描功率为260 W, 扫描间距为0.10 mm, 扫描速度为550 mm/s, 铺粉厚度为0.02 mm, 保护气氛为氮气, 所述打印产品致密度为99.2%。

[0042] 对比例2

对比例2采用传统冶炼制造工艺制造与实施例1-4成分相似的15-5PH马氏体不锈钢。采用峰值时效工艺: 升温速率为8  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , 直至升温到500 $^{\circ}\text{C}$ , 保温4h。

[0043] 对比例3

与对比例1不同之处在于, 对比例3对合金成分进行了稍微降低, 尤其是Ni和Cu含量。具体工艺如下:

一种增材制造不锈钢, 采用如下制备工艺:

S1、取不锈钢粉末备用:

粉末成分为C: 0.039 wt%, Si: 0.42 wt%, Mn: 0.53 wt%, Cr: 14.35 wt%, Ni: 4.39 wt%, Cu: 3.25 wt%, Nb: 0.485 wt%。余者为Fe和不可避免的杂质元素。粉末粒径为15-45  $\mu\text{m}$ , 平均直径23.65  $\mu\text{m}$ , 无空心粉, 球形度95%以上, 未检测到夹杂物, 氧含量为167 ppm;

S2、将步骤S1所述粉末采用3D打印工艺进行打印形成打印产品:

3D打印工艺的光斑直径为100 $\mu\text{m}$ , 扫描功率为260 W, 扫描间距为0.10 mm, 扫描速度为550 mm/s, 铺粉厚度为0.02 mm, 保护气氛为氮气, 所述打印产品致密度为99.4%。

[0044] 3. 对步骤S2形成的打印产品进行热处理:

所述热处理在马弗炉中进行, 热处理的升温速率为8  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , 直至升温到480 $^{\circ}\text{C}$ , 保温4h。

[0045] 对各实施例和对比例制备的不锈钢进行测试, 得到的性能测试结果见表1。

[0046] 表1 本发明实施例和对比例不锈钢性能测试结果

	抗拉强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	断后伸长率 (%)
实施例 1	1310	1410	16.3
实施例 2	1325	1445	16.9
实施例 3	1330	1453	15.9
实施例 4	1270	1385	16.4
对比例 1	1083	1181	17.5
对比例 2	1170	1265	12.5
对比例 3	1533	1648	8.6

图1为本发明增材制造高强韧不锈钢相组成与Cr当量和Ni当量的关系。由图1可以



看出,以实施例1为例,本发明实施例1的合金成分的Cr当量 $Cr_{eq}$ 为14.999,Ni当量 $Ni_{eq}$ 为8.35,Cr当量、Ni当量对应的区域位于马氏体和奥氏体双相区。

[0047] 图2为本发明实施例1不锈钢的显微组织结果,由此可知,显微组织主要为马氏体基体,奥氏体含量约25%。其中包含分布于熔池线底部的大块奥氏体(17%)和分布于马氏体板条间的薄膜奥氏体(8%)。

[0048] 图3为本发明各实施例和对比例不锈钢室温拉伸测试图。由图3可知,实施例1的屈服强度为1.31 GPa,比传统高强度马氏体不锈钢(对比例2)屈服强度高140 MPa;抗拉强度为1.41 GPa,比传统高强度马氏体不锈钢(对比例2)高145 MPa。其断后伸长率为16.3%,比传统高强度不锈钢(对比例2)高3.8%。对比例1未进行热处理的增材制造异质结构马氏体不锈钢显示出17.5%的断后延伸率。

[0049] 针对相似成分的传统马氏体不锈钢进行抗拉强度及断后伸长率统计分析,如图4可知,实施例1试样强度和断后伸长率同步提高,打破了传统马氏体不锈钢的强塑性倒置矛盾关系。较高的强度来源于打印过程和时效处理的高密度位错和纳米级多重析出相;较好的塑性主要来源于高含量异质结构奥氏体的协调变形。

[0050] 以上所述仅为本发明的优选实施例,并非因此限制本发明的专利范围,凡是在本发明的发明构思下,利用本发明说明书内容所作的等效结构变换,或直接/间接运用在其他相关的技术领域均包括在本发明的专利保护范围内。

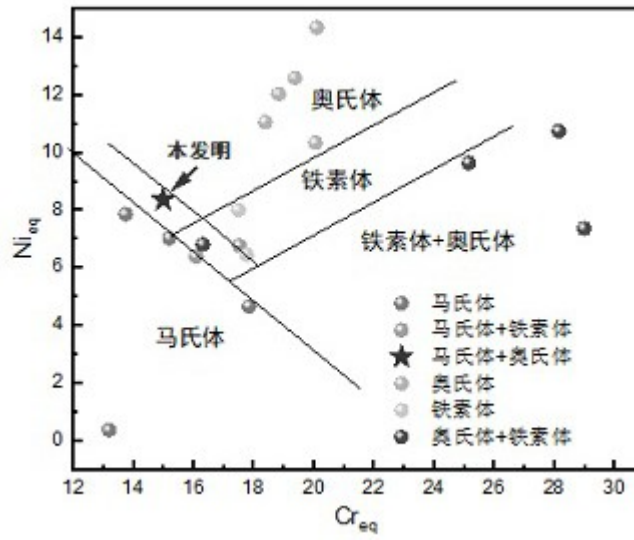


图1

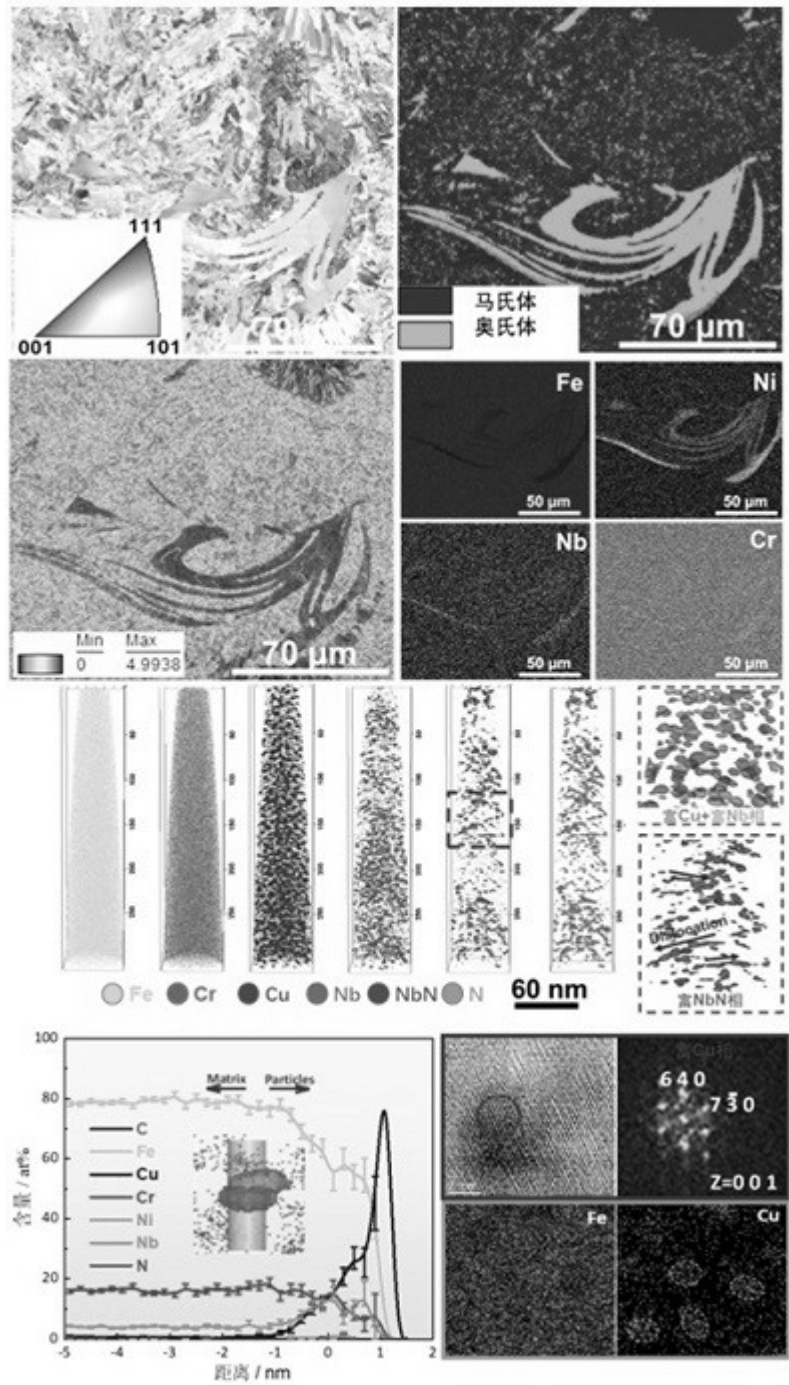


图2

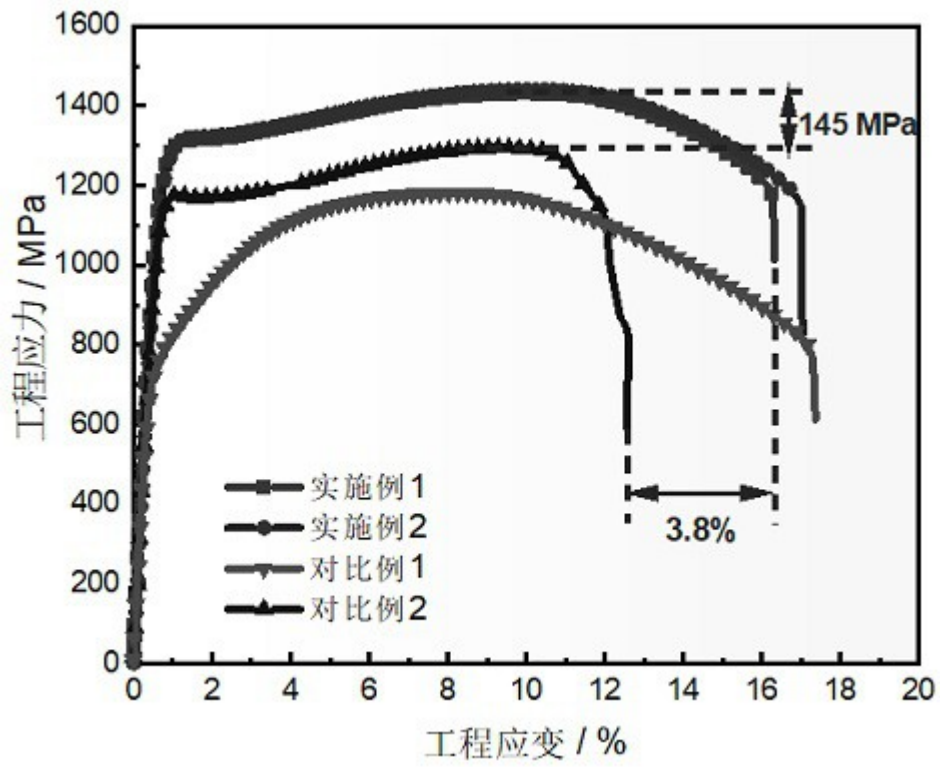


图3

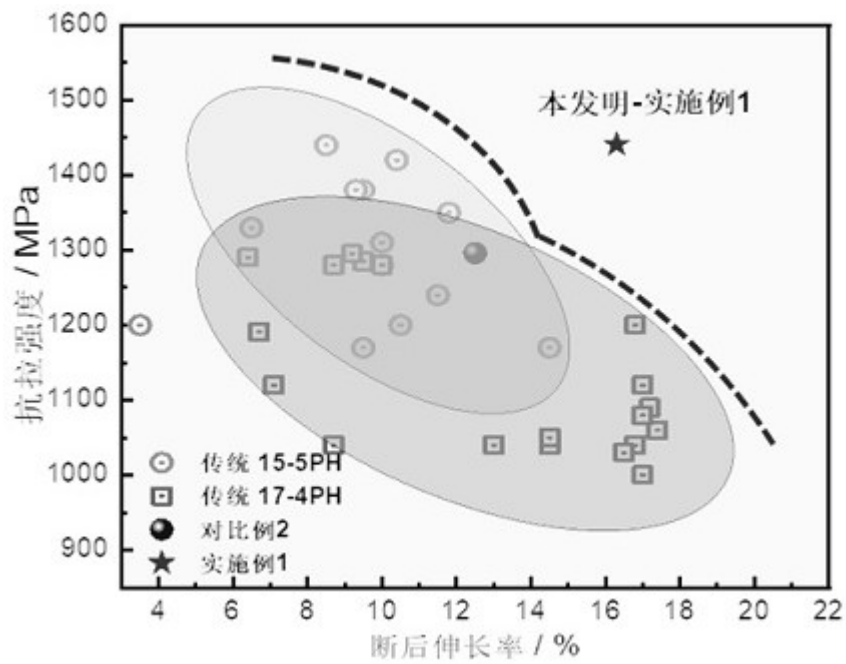


图4