



(21) 申请号 202210559965.9

B23K 35/40 (2006.01)

(22) 申请日 2022.05.19

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 109128585 A, 2019.01.04

申请公布号 CN 115008065 A

CN 104741834 A, 2015.07.01

(43) 申请公布日 2022.09.06

CN 107999991 A, 2018.05.08

(73) 专利权人 北京工业大学

CN 113210926 A, 2021.08.06

地址 100124 北京市朝阳区平乐园100号

DE 102017213391 A1, 2018.02.08

(72) 发明人 李红 姚永生 栗卓新 李国栋
王义朋

JP 2005059077 A, 2005.03.10

US 2021260704 A1, 2021.08.26

(74) 专利代理机构 北京思海天达知识产权代理
有限公司 11203

CN 113814606 A, 2021.12.21

CN 104907740 A, 2015.09.16

审查员 汪卫婷

专利代理师 张立改

(51) Int. Cl.

B23K 35/30 (2006.01)

B23K 35/32 (2006.01)

权利要求书1页 说明书7页

(54) 发明名称

用于钛-钢焊缝高熵化的药芯焊丝及其制备方法

(57) 摘要

用于钛-钢焊缝高熵化的药芯焊丝及其制备方法,属于焊接技术领域。包括药芯和外皮;药芯按质量百分比由以下组分组成:钛粉10~30%,铁粉10~50%,铌粉10~50%,钼粉10~30%,以上组分质量百分比之和为100%;外皮选用Ni-Cr-Co系镍基合金带,其主要成分为:Co含量27%~33%,Cr含量26%~30%,Fe含量2.5%~3.5%,Ni余量;药芯的包覆率为15%。进行钛-钢异种金属熔化焊接,焊缝金属的化学成分处在高熵合金的主元范围内,焊缝处的结构组织趋向形成简单的BCC+FCC固溶相,实现焊缝的高熵化,易于获得优质的钛-钢焊接接头。

1. 一种钛-钢焊接用焊缝高熵化药芯焊丝,其特征在于,包括药芯和外皮;

药芯按质量百分比由以下组分组成:钛粉10~20%,铁粉20~30%,铌粉30~40%,钼粉20~30%,以上组分质量百分比之和为100%;外皮选用Ni-Cr-Co系镍基合金带,其主要成分为:Co含量27%~33%,Cr含量26%~30%,Fe含量2.5%~3.5%,Ni余量;药芯的包覆率为15%。

2. 按照权利要求1所述的一种钛-钢焊接用焊缝高熵化药芯焊丝,其特征在于,药芯成分组成,按质量百分比由以下组分组成:Ti为10%,Fe为20%,Nb为40%,Mo为30%,质量百分比之和为100%。

3. 按照权利要求1所述的一种钛-钢焊接用焊缝高熵化药芯焊丝,其特征在于,药芯成分组成,按质量百分比由以下组分组成:Ti为20%,Fe为30%,Nb为30%,Mo为20%,质量百分比之和为100%。

4. 按照权利要求1所述的一种钛-钢焊接用焊缝高熵化药芯焊丝,其特征在于,药芯成分组成,按质量百分比由以下组分组成:Ti为20%,Fe为40%,Nb为20%,Mo为20%,质量百分比之和为100%。

5. 按照权利要求1所述的一种钛-钢焊接用焊缝高熵化药芯焊丝,其特征在于,钛粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目;铁粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目;铌粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目;钼粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目。

6. 权利要求1-5任一项所述的一种钛-钢焊接用焊缝高熵化药芯焊丝的制备方法,其特征在于,具体按照以下步骤实施:

步骤1,分别称取质量百分比为10~30%的金属钛粉,10~50%的金属铁粉,10~50%的金属铌粉,10~30%的钼粉,以上组分质量百分比之和为100%;分别放入真空炉中加入至150℃后保温2小时;然后将烘干后的钼粉、钛粉、铁粉、铌粉放到混粉机中,搅拌均匀;

步骤2,利用清洗设备将镍基合金带清洗干净并在85℃下烘干,再进行轧制成U形凹槽;

步骤3,将混合后的粉末倒入加料机上,按照15%的填充率填入带U形凹槽的镍基合金带上;将U形凹槽合口,在药芯焊丝成型机上闭合成O形,拉拔成直径为2.5mm的焊丝;

步骤4,再将焊丝放到减径机上,更换不同孔径的模具逐级减径拉拔。

7. 按照权利要求6所述的方法,其特征在于,步骤4,每次拉拔减径幅度为0.1mm,最终制得直径为1.2mm的药芯焊丝。

8. 权利要求1-5任一项所述的一种钛-钢焊接用焊缝高熵化药芯焊丝的应用,用于钛-钢异种金属熔化焊接。

9. 按照权利要求8所述的应用,使得焊缝金属的化学成分保持在形成高熵合金的主元范围内,焊缝处的结构组织趋向形成简单的BCC+FCC固溶相,实现焊缝的高熵化。

用于钛-钢焊缝高熵化的药芯焊丝及其制备方法

技术领域

[0001] 本发明属于焊接技术领域,涉及一种用于钛-钢焊缝高熵化的药芯焊丝及其制备方法。

背景技术

[0002] 钛及钛合金具有高韧性、高比强度、优良的耐高温及耐腐蚀等优良特点,广泛应用于航空航天、医疗、船舶、电力、汽车制造等领域。但其价格昂贵、焊接和加工性能较差难以满足工业生产需求。而不锈钢作为常用的结构材料,具有优异的焊接性、耐磨性及力学性能,且加工成本相对较低。将具有良好焊接性的不锈钢与优异耐腐蚀性的钛合金通过焊接的方法制备得到钛-不锈钢异种金属复合结构,从而实现两种材料在性能上的优势互补,且成本较低,广泛应用于航空航天、海洋工程、石油化工、电力工业等行业。

[0003] 但由于钛-钢之间物理与化学性能差异较大,导致其在焊接中存在很大困难。在物理性能上,熔点的差异导致先熔化的铁会渗入到未熔化母材过热区的晶界处,使得合金元素烧损;钛与钢的热膨胀系数和热导率有较大差异,使得在冷却时会导致接头存在残余应力和变形,进而产生裂纹;钛在高温下吸收气体,产生气孔等缺陷。在化学性能上,钛-钢容易在焊接中产生大量的脆性金属间化合物($TiFe_2$ 、 $TiFe$ 、 TiC 等)。这些问题导致了钛-钢接头强度较低。目前钛-钢复合构件的生产采用钎焊、扩散焊、摩擦焊、爆炸焊等方法,但这些方法受制于接头形式单一、生产效率低下制约了钛-钢异种金属复合结构的进一步推广应用。而熔化焊不仅可以实现钛-钢异种材料的高效连接,而且具有加工效率高,工艺灵活的特点。

[0004] 大量研究表明,中间层金属的选用是实现钛-钢熔焊连接的关键,而在众多已报道的中间层材料中,采用高熵合金获得的钛-钢异种金属接头组织主要由BCC+FCC固溶相组成,接头实现了可靠的冶金结合。利用高熵合金的高熵效应抑制钛-钢形成脆性金属间化合物,并使得焊缝趋向形成简单的BCC+FCC固溶相,既提高焊缝的韧性又提高了结合强度,为实现钛-钢的高性能熔焊提供了全新的技术思路。

[0005] 现有技术中高熵合金填充材料需要提前通过球磨,真空电弧熔炼等工艺制备,随后利用高熵合金扩散迟滞效应减少元素接触,利用高熵效应抑制金属间化合物的生成,从而实现焊缝性能的提高,但是制备高熵合金成本高,工艺复杂,不易改变成分实现合金元素过渡。因此设计一种基于钛-钢焊缝高熵化的药芯焊丝,使得焊缝处形成高熵合金,发挥其高熵效应,有效抑制界面金属间化合物,其工艺简单,成本低,可以通过改变药粉配比改变焊丝成分,具有柔性制造的特点。为解决钛-钢异种材料的焊接难题,降低制备成本,扩大高熵合金的焊接应用范围都具有显著意义。

发明内容

[0006] 本发明将高熵合金技术和药芯焊丝技术有机结合,得到了一种基于焊缝高熵化的药芯焊丝及其制备方法,目的是解决现有技术中存在的钛与不锈钢直接熔焊时,焊缝中易

形成大量脆性金属间化合物而导致焊接接头强度较低的问题。利用本发明的焊缝高熵化药芯焊丝进行钛-钢异种金属熔化焊接(可以采用TIG、MIG、CMT或激光焊等自动焊接方法),焊缝金属的化学成分处在高熵合金的主元范围内,焊缝处的结构组织趋向形成简单的BCC+FCC固溶相,实现焊缝的高熵化,易于获得优质的钛-钢焊接接头。

[0007] 本发明另一个目的是将高熵化焊接材料制作成药芯焊丝用于自动化焊接,提高钛-钢异种金属焊接效率并降低成本。

[0008] 本发明采用的技术方案是,钛-钢焊接用焊缝高熵化药芯焊丝,包括药芯和外皮。

[0009] 药芯按质量百分比由以下组分组成:钛粉10~30%,铁粉10~50%,铌粉10~50%,钼粉10~30%,以上组分质量百分比之和为100%;外皮选用Ni-Cr-Co系镍基合金带,其主要成分为:Co含量27%~33%,Cr含量26%~30%,Fe含量2.5%~3.5%,Ni余量。药芯的包覆率为15%。

[0010] 优选地,一种药芯成分组成,按质量百分比由以下组分组成:Ti为10%,Fe为20%,Nb为40%,Mo为30%,质量百分比之和为100%。

[0011] 优选地,一种药芯成分组成,按质量百分比由以下组分组成:Ti为20%,Fe为30%,Nb为30%,Mo为20%,质量百分比之和为100%。

[0012] 优选地,一种药芯成分组成,按质量百分比由以下组分组成:Ti为30%,Fe为40%,Nb为20%,Mo为20%,质量百分比之和为100%。

[0013] 本发明的特点还在于,

[0014] 钛粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目;铁粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目;铌粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目;钼粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目。

[0015] 本发明所采用的另一个技术方案是,钛-钢焊接用焊缝高熵化药芯焊丝的制备方法,具体按照以下步骤实施:

[0016] 步骤1,分别称取质量百分比为10~30%的金属钛粉,10~50%的金属铁粉,10~50%的金属铌粉,10~30%的钼粉,以上组分质量百分比之和为100%;分别放入真空炉中加入至150℃后保温2小时;然后将烘干后的钼粉、钛粉、铁粉、铌粉放到混粉机中,搅拌均匀;

[0017] 步骤2,利用清洗设备将镍基合金带清洗干净并在85℃下烘干,再进行轧制成U形凹槽;

[0018] 步骤3,将混合后的粉末倒入加料机上,按照15%的填充率填入带U形凹槽的镍基合金带上;将U形凹槽合口,在药芯焊丝成型机上闭合成O形,拉拔成直径为2.5mm的焊丝;

[0019] 步骤4,再将焊丝放到减径机上,更换不同孔径的模具逐级减径拉拔,优选每次拉拔减径幅度为0.1mm,最终制得直径为1.2mm的药芯焊丝。

[0020] 本发明的特点还在于,

[0021] 步骤1中的钛粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目;铁粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目;铌粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目;钼粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目。

[0022] 在本发明的药粉配置和外皮选择过程中,对各化学元素的组成及含量限定理由分别叙述如下:

[0023] 为了提高钛与钢焊接接头的综合力学性能,需要焊缝金属的化学成分保持在形成高熵合金的主元范围内。针对待焊母材金属Ti和Fe的成分特点,焊丝选择Ti-Co-Cr-Ni-Fe

五主元高熵合金。主要原因有以下几点：

[0024] 1、焊接过程中母材的熔化和近缝区母材向熔池的溶解不可避免，会使得焊缝中Ti、Fe元素增加，因此这两种元素在焊丝中的含量要低于其他主元。

[0025] 2、Co与Cr与金属Fe和Ti都有很好的相容性且几乎不影响合金的结构，并有效避免脆性金属间化合物的产生。

[0026] 3、通过在焊丝中加入Ni元素，其既可以与Fe无限固溶，又可以和Ti、Co、Cr等互溶，Ni的加入能够改善焊缝和母材的相容性，抑制金属间化合物的产生。

[0027] 4、微量Nb元素与钛能形成无限固溶体，有很好的互溶特性，能细化钛晶粒，提高焊接接头抗氧化性能；微量Mo元素对铁素体有固溶强化的作用，且能细化钛组织，降低合金热膨胀系数，对提高焊缝强韧性有很大的作用。

[0028] 应用该高熵化药芯焊丝进行焊接，焊缝金属是高熵合金，实现了焊缝的高熵化，有效抑制了脆性金属间化合物的生成，焊接接头强度较高。

[0029] 本发明的有益效果是，本发明将高熵合金技术和药芯焊丝技术有机结合，得到了一种焊缝高熵化的药芯焊丝，利用本发明的药芯焊丝进行钛-钢异种金属自动化焊接，在获得优质的钛-钢焊接接头的同时具有高效率，焊缝金属的化学成分处在高熵合金的主元范围内，焊缝处的结构组织趋向形成简单的BCC+FCC固溶相，实现了焊缝的高熵化。焊缝处利用高熵效应有效抑制了脆性金属间化合物相的生长，综合机械性能良好。

[0030] 本发明设计合理，该焊缝高熵化药芯焊丝易于加工成型、成本低廉，该高熵化药芯焊丝操作工艺简单、方便、高效、便于进行大规模批量生产，具有很好的市场应用价值。

具体实施方式：

[0031] 通过下面的实施例可以对本发明进行进一步的描述，但应该指出本发明的实施不限于以下的实施例。

[0032] 本发明钛-钢焊接用药芯焊丝，包括药芯和外皮，其中药芯按质量百分比由以下组分组成：钛粉10~30%，铁粉10~50%，铌粉10~50%，钼粉10~30%，以上组分质量百分比之和为100%；外皮为厚度0.3mm、宽度10mm的Ni-Cr-Co系镍基合金带。

[0033] 钛粉纯度 $\geq 99.95\%$ ，粒径为100目；铁粉纯度 $\geq 99.95\%$ ，粒径为100目；铌粉纯度 $\geq 99.95\%$ ，粒径为100目；钼粉纯度 $\geq 99.95\%$ ，粒径为100目；

[0034] 镍基合金钢带主要成分及含量为：Co含量27%~33%，Cr含量26%~30%，Fe含量2.5%~3.5%，Ni余量。

[0035] 本发明钛-不锈钢焊接用焊缝高熵化药芯焊丝的制备方法，具体按照以下步骤实施：

[0036] 分别称取质量百分比为10~30%的金属钛粉，10~50%的金属铁粉，10~50%的金属铌粉，10~30%的钼粉，以上组分质量百分比之和为100%；分别放入真空炉中加入至150℃后保温2小时；然后将烘干后的钼粉、钛粉、铁粉、铌粉放到混粉机中，搅拌均匀；

[0037] 利用清洗设备将镍基合金带清洗干净并在85℃下烘干，再进行轧制成U形凹槽；

[0038] 将混合后的粉末倒入加料机上，按照15%的填充率填入带U形凹槽的镍基合金带上；将U形凹槽合口，在药芯焊丝成型机上闭合成O形，拉拔成直径为2.5mm的焊丝；

[0039] 再将焊丝放到减径机上，更换不同孔径的模具逐级减径拉拔，每次拉拔减径幅度

为0.1mm,最终制得直径为1.2mm的药芯焊丝。

[0040] 实施例1

[0041] 分别称取质量百分比为30%的金属钼粉,10%的金属铁粉,10%的金属铁粉,50%的铌粉,以上组分质量百分比之和为100%,分别放入真空炉中加入至150℃后保温2小时;然后将烘干后的钼粉、铁粉、铌粉放到混粉机中,搅拌均匀;

[0042] 钛粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目;铁粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目;铌粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目;钼粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目;

[0043] 利用清洗设备将镍基合金带清洗干净并在85℃下烘干,再进行轧制成U形凹槽;

[0044] 将混合后的粉末倒入加料机上,按照15%的填充率填入带U形凹槽的镍基合金带上;将U形凹槽合口,在药芯焊丝成型机上闭合成O形,拉拔成直径为2.5mm的焊丝;

[0045] 再将焊丝放到减径机上,更换不同孔径的模具逐级减径拉拔,每次拉拔减径幅度为0.1mm,最终制得直径为1.2mm的药芯焊丝。

[0046] 用实施1制备的药芯焊丝,焊接TA2-304不锈钢,焊接工艺为:TA2钛板在上,304不锈钢板在下,进行搭接焊,采用熔化极气体保护焊,气体采用氩气(纯度99.99%,气流量1.8L/min),焊接电流70A,焊接电压9.2V,送丝速度2.0m/min,焊接速度3.3mm/s,条件下进行焊接,焊缝成分可以控制在形成高熵合金的有效成分范围。

[0047] 焊后测得焊缝金属主要元素含量表(包括如下原子百分比\at%)

	Fe	Cr	Ni	Co	Ti	Nb	Mo
含量	11.88%	24.20%	23.06%	20.67%	15.65%	2.53%	2.00%

[0049] 根据熵值公式($\Delta S_{mix} = \sum_{i=1}^n -RC_i \ln C_i$)、焓值公式($\Delta H_{mix} = \sum_{i=1, i \neq j}^n 4c_i c_j \Delta H_{mix}^{ij}$)、原子

半径差公式($\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i \left(1 - r_i / \sum_{j=1}^n c_j r_j\right)^2}$)、平均价电子浓度公式($VEC = \sum_{i=1}^n c_i (VEC)_i$)

计算,其熵值为 $1.55R = 12.88\text{KJ}^{-1}\text{mol}^{-1}$ ($1.55R > 1.5R$)、混合焓值为 -13.79KJ/mol ($-15\text{KJ/mol} < -13.79\text{KJ/mol} < 5\text{KJ/mol}$)、原子半径差为 5.67% ($5.67\% < 6\%$)、平均价电子浓度为 7.19 ($6.5 < 7.19 < 8$)。经过理论计算及实际检测所知焊缝成分为高熵合金,其焊缝达到高熵化效果,且焊缝区由BCC+FCC固溶相组成。通过观察发现焊接接头界面结合良好,未见明显焊接缺陷和裂纹。根据GB/T 2651-2008焊接接头拉伸试验方法对样品进行力学性能测试,拉伸强度为 324MPa 。

[0050] 实施例2

[0051] 分别称取质量百分比为30%的金属钼粉,20%的金属铁粉,10%的金属钛粉,40%的铌粉,以上组分质量百分比之和为100%,分别放入真空炉中加入至150℃后保温2小时;然后将烘干后的钼粉、钛粉、铁粉、铌粉放到混粉机中,搅拌均匀;

[0052] 钛粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目;铁粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目;铌粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目;钼粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目;

[0053] 利用清洗设备将镍基合金带清洗干净并在85℃下烘干,在进行轧制成U形凹槽;

[0054] 将混合后的粉末倒入加料机上,按照15%的填充率填入带U形凹槽的镍基合金带上;将U形凹槽合口,在药芯焊丝成型机上闭合成O形,拉拔成直径为2.5mm的焊丝;

[0055] 再将焊丝放到减径机上,更换不同孔径的模具逐级减径拉拔,每次拉拔减径幅度为0.1mm,最终制得直径为1.2mm的药芯焊丝。

[0056] 用实施1制备的药芯焊丝,焊接TA2-304不锈钢,焊接工艺为:TA2钛板在上,304不锈钢板在下,进行搭接焊,采用熔化极气体保护焊,气体采用氩气(纯度99.99%,气流量1.8L/min),焊接电流70A,焊接电压9.2V,送丝速度2.0m/min,焊接速度3.3mm/s,条件下进行焊接,焊缝成分可以控制在形成高熵合金的有效成分范围。

[0057] 焊后测得焊缝金属各主元元素含量表(包括原子百分比\at%)

	Fe	Cr	Ni	Co	Ti	Nb	Mo
含量	12.61%	24.13%	22.99%	20.61%	15.60%	2.06%	2.00%

[0059] 根据熵值公式($\Delta S_{mix} = \sum_{i=1}^n -RC_i \ln C_i$)、焓值公式($\Delta H_{mix} = \sum_{i=1, i \neq j}^n 4c_i c_j \Delta H_{mix}^{ij}$)、原子半径

差公式($\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i \left(1 - r_i / \sum_{j=1}^n c_j r_j\right)^2}$)、 $\bar{r} = \sum_{i=1}^n c_i r_i$ 、平均价电子浓度公式($VEC = \sum_{i=1}^n c_i (VEC)_i$)

计算,其合金熵值为 $1.56R = 12.97 \text{KJ}^{-1} \text{mol}^{-1}$ ($1.56R > 1.5R$)、混合焓值为 -13.82KJ/mol ($-15 \text{KJ/mol} < -13.82 \text{KJ/mol} < 5 \text{KJ/mol}$)、原子半径差为 5.62% ($5.62\% < 6\%$)、平均价电子浓度为 7.23 ($6.5 < 7.23 < 8$)。经过理论计算及实际检测所知焊缝成分为高熵合金,其焊缝达到高熵化效果,且焊缝区由BCC+FCC固溶相组成。通过检测发现焊缝金属融合良好,融合区无裂纹,熔合线附近为致密的等轴晶和树枝晶。根据GB/T 2651-2008焊接接头拉伸试验方法对样品进行力学性能测试,拉伸强度为 341MPa 。

[0060] 实施例3

[0061] 分别称取质量百分比为20%的金属钼粉,30%的金属铁粉,20%的金属钛粉,30%的铌粉,以上组分质量百分比之和为100%,分别放入真空炉中加入至 150°C 后保温2小时;然后将烘干后的钼粉、钛粉、铁粉、铌粉放到混粉机中,搅拌均匀;

[0062] 钛粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目;铁粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目;铌粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目;钼粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目;

[0063] 利用清洗设备将镍基合金带清洗干净并在 85°C 下烘干,在进行轧制成U形凹槽;

[0064] 将混合后的粉末倒入加料机上,按照15%的填充率填入带U形凹槽的镍基合金带上;将U形凹槽合口,在药芯焊丝成型机上闭合成O形,拉拔成直径为 2.5mm 的焊丝;

[0065] 再将焊丝放到减径机上,更换不同孔径的模具逐级减径拉拔,每次拉拔减径幅度为0.1mm,最终制得直径为1.2mm的药芯焊丝。

[0066] 用实施1制备的药芯焊丝,焊接TA2-304不锈钢,焊接工艺为:TA2钛板在上,304不锈钢板在下,进行搭接焊,采用熔化极气体保护焊,气体采用氩气(纯度99.99%,气流量1.8L/min),焊接电流70A,焊接电压9.2V,送丝速度2.0m/min,焊接速度3.3mm/s,条件下进行焊接,焊缝成分可以控制在形成高熵合金的有效成分范围。

[0067] 焊后测得焊缝金属各主元元素含量表(包括原子百分比\at%)

	Fe	Cr	Ni	Co	Ti	Nb	Mo
含量	13.30%	23.98%	22.85%	20.49%	16.4%	1.59%	1.39%

[0069] 根据熵值公式($\Delta S_{mix} = \sum_{i=1}^n -RC_i \ln C_i$)、焓值公式($\Delta H_{mix} = \sum_{i=1, i \neq j}^n 4c_i c_j \Delta H_{mix}^{ij}$)、原子半径

差公式($\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i \left(1 - r_i / \sum_{j=1}^n c_j r_j\right)^2}$)、 $\bar{r} = \sum_{i=1}^n c_i r_i$ 、平均价电子浓度公式($VEC = \sum_{i=1}^n c_i (VEC)_i$)

计算,其合金熵值为 $1.58R = 13.14 \text{KJ}^{-1} \text{mol}^{-1}$ ($1.58R > 1.5R$)、混合焓值为 -14.39KJ/mol ($-15 \text{KJ/mol} < -14.39 \text{KJ/mol} < 5 \text{KJ/mol}$)、原子半径差为 5.6% ($5.6\% < 6\%$)、平均价电子浓度为 7.29 ($6.5 < 7.29 < 8$)。经过理论计算及实际检测所知焊缝成分为高熵合金,其焊缝达到高熵化效果,且焊缝区由BCC+FCC固溶相组成。通过检测发现焊缝金属融合性好,无表面气孔、夹杂等缺陷,焊缝组织基本为致密的等轴晶和树枝晶。根据GB/T 2651-2008焊接接头拉伸试验方法对样品进行力学性能测试,拉伸强度为 367MPa 。

[0070] 实施例4

[0071] 分别称取质量百分比为20%的金属钼粉,40%的金属铁粉,20%的金属钛粉,20%的铌粉,以上组分质量百分比之和为100%,分别放入真空炉中加入至 150°C 后保温2小时;然后将烘干后的钼粉、钛粉、铁粉、铌粉放到混粉机中,搅拌均匀;

[0072] 钛粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目;铁粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目;铌粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目;钼粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目;

[0073] 利用清洗设备将镍基合金带清洗干净并在 85°C 下烘干,在进行轧制成U形凹槽;

[0074] 将混合后的粉末倒入加料机上,按照15%的填充率填入带U形凹槽的镍基合金带上;将U形凹槽合口,在药芯焊丝成型机上闭合成O形,拉拔成直径为 2.5mm 的焊丝;

[0075] 再将焊丝放到减径机上,更换不同孔径的模具逐级减径拉拔,每次拉拔减径幅度为 0.1mm ,最终制得直径为 1.2mm 的药芯焊丝。

[0076] 用实施1制备的药芯焊丝,焊接TA2-304不锈钢,焊接工艺为:TA2钛板在上,304不锈钢板在下,进行搭接焊,采用熔化极气体保护焊,气体采用氩气(纯度 99.99% ,气流量 1.8L/min),焊接电流 70A ,焊接电压 9.2V ,送丝速度 2.0m/min ,焊接速度 3.3mm/s ,条件下进行焊接,焊缝成分可以控制在形成高熵合金的有效成分范围。

[0077] 焊后测得焊缝金属各主元元素含量表(包括原子百分比\at%)

	Fe	Cr	Ni	Co	Ti	Nb	Mo
含量	14.02%	23.91%	22.78%	20.42%	16.35%	1.13%	1.39%

[0079] 根据熵值公式($\Delta S_{mix} = \sum_{i=1}^n -RC_i \ln C_i$)、焓值公式($\Delta H_{mix} = \sum_{i=1, i \neq j}^n 4c_i c_j \Delta H_{mix}^{ij}$)、原子半径

差公式($\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i \left(1 - r_i / \sum_{j=1}^n c_j r_j\right)^2}$)、 $\bar{r} = \sum_{i=1}^n c_i r_i$ 、平均价电子浓度公式($VEC = \sum_{i=1}^n c_i (VEC)_i$)

计算,其合金熵值为 $1.58R = 13.14 \text{KJ}^{-1} \text{mol}^{-1}$ ($1.58R > 1.5R$)、混合焓值为 -14.41KJ/mol ($-15 \text{KJ/mol} < -14.41 \text{KJ/mol} < 5 \text{KJ/mol}$)、原子半径差为 5.56% ($5.56\% < 6\%$)、平均价电子浓度为 7.33 ($6.5 < 7.33 < 8$)。经过理论计算及实际检测所知焊缝成分为高熵合金,其焊缝达到高熵化效果,且焊缝区由BCC+FCC固溶相组成。通过检测发现焊缝金属融合性好,无表面气孔、夹杂等缺陷,焊缝组织基本为致密的等轴晶和树枝晶。根据GB/T 2651-2008焊接接头拉伸试验方法对样品进行力学性能测试,拉伸强度为 332MPa 。

[0080] 实施例5

[0081] 分别称取质量百分比为50%的金属铁粉,30%的金属钛粉,10%的金属钼粉,10%

的铌粉,以上组分质量百分比之和为100%,分别放入真空炉中加入至150℃后保温2小时;然后将烘干后的钼粉、钛粉、铁粉、铌粉放到混粉机中,搅拌均匀;

[0082] 钛粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目;铁粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目;铌粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目;钼粉纯度 $\geq 99.95\%$,粒径为100目;

[0083] 利用清洗设备将镍基合金带清洗干净并在85℃下烘干,在进行轧制成U形凹槽;

[0084] 将混合后的粉末倒入加料机上,按照15%的填充率填入带U形凹槽的镍基合金带上;将U形凹槽合口,在药芯焊丝成型机上闭合成O形,拉拔成直径为2.5mm的焊丝;

[0085] 再将焊丝放到减径机上,更换不同孔径的模具逐级减径拉拔,每次拉拔减径幅度为0.1mm,最终制得直径为1.2mm的药芯焊丝。

[0086] 用实施1制备的药芯焊丝,焊接TA2-304不锈钢,焊接工艺为:TA2钛板在上,304不锈钢板在下,进行搭接焊,采用熔化极气体保护焊,气体采用氩气(纯度99.99%,气流量1.8L/min),焊接电流70A,焊接电压9.2V,送丝速度2.0m/min,焊接速度3.3mm/s,条件下进行焊接,焊缝成分可以控制在形成高熵合金的有效成分范围。

[0087] 焊后测得焊缝金属各主元元素含量表(包括原子百分比\at%)

[0088]	Fe	Cr	Ni	Co	Ti	Nb	Mo
含量	14.69%	23.77%	22.65%	20.30%	17.13%	0.67%	0.80%

[0089] 根据熵值公式($\Delta S_{mix} = \sum_{i=1}^n -RC_i \ln C_i$)、焓值公式($\Delta H_{mix} = \sum_{i=1, i \neq j}^n 4c_i c_j \Delta H_{mix}^{ij}$)、原子半径

差公式($\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i \left(1 - r_i / \sum_{j=1}^n c_j r_j\right)^2}$)、 $\bar{r} = \sum_{i=1}^n c_i r_i$ 、平均价电子浓度公式($VEC = \sum_{i=1}^n c_i (VEC)_i$)

计算,其合金熵值为 $1.59R = 13.22 \text{KJ}^{-1} \text{mol}^{-1}$ ($1.59R > 1.5R$)、混合焓值为 -14.98KJ/mol ($-15 \text{KJ/mol} < -14.98 \text{KJ/mol} < 5 \text{KJ/mol}$)、原子半径差为5.54% ($5.54\% < 6\%$)、平均价电子浓度为7.39 ($6.5 < 7.39 < 8$)。经过理论计算及实际检测所知焊缝成分为高熵合金,其焊缝达到高熵化效果,且焊缝区由BCC+FCC固溶相组成。通过检测发现焊缝金属融合良好,融合区无裂纹,焊缝组织为较致密的等轴晶和树枝晶。根据GB/T2651-2008焊接接头拉伸试验方法对样品进行力学性能测试,拉伸强度为312MPa。