



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114606416 A

(43) 申请公布日 2022.06.10

(21) 申请号 202210301992.6

(22) 申请日 2022.03.25

(71) 申请人 华南理工大学

地址 510640 广东省广州市天河区五山路  
381号

(72) 发明人 朱德智 庄怀斌 罗铭强 王顺成

(74) 专利代理机构 广州粤高专利商标代理有限公司 44102

专利代理师 林奕聪

(51) Int. Cl.

C22C 21/00 (2006.01)

C22C 30/06 (2006.01)

B22F 3/105 (2006.01)

B22F 9/04 (2006.01)

C22C 1/04 (2006.01)

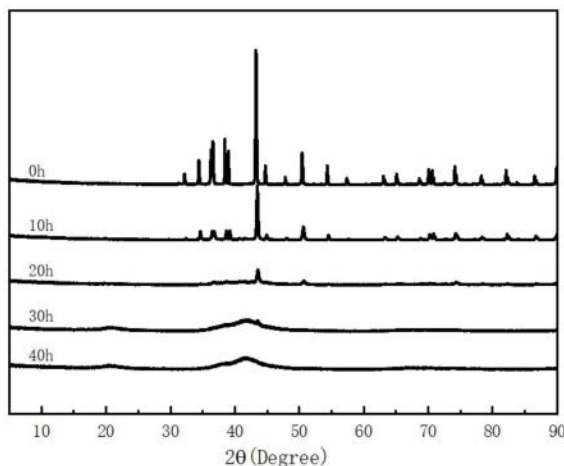
权利要求书1页 说明书8页 附图4页

(54) 发明名称

一种黏性流动态高熵非晶合金增强铝基复合材料及其制备方法

(57) 摘要

本发明公开了一种黏性流动态高熵非晶合金增强铝基复合材料及其制备方法。高熵非晶合金的元素组成为Mg、Al、Zn、Cu、Ti、Cr、Mn、Ni中的4~6种。对按照所需成分配比混合后的粉末进行机械合金化后可以得到本发明中的高熵非晶合金粉末,该高熵非晶合金过冷液相区的温度与粉末冶金制备铝基复合材料的烧结温度重合。通过放电等离子烧结工艺对混合均匀的高熵非晶合金增强铝基复合材料粉末进行烧结,在烧结温度内处于黏性流动态的高熵非晶合金粉末经挤压形成了非连续网状结构,该特殊的结构提高铝基复合材料的强度和塑性。本发明中所制备的黏性流动态高熵非晶合金增强铝基复合材料具有高强度、高塑性、高致密度、低密度等优良性能。



1. 一种黏性流动态高熵非晶合金增强铝基复合材料的制备方法,其特征在于,包括以下步骤:

(1) 按对应的成分配比要求称取Mg、Al、Zn、Cu、Ti、Cr、Mn、Ni中的4-6种金属单质粉末,将粉末置于球磨机中;先低转速混粉后高转速高能球磨,通过机械合金化的方式制得高熵非晶合金粉末;

(2) 将高熵非晶合金粉末与1xxx~7xxx系铝合金粉末按所需成分配比在行星球磨机中进行均匀混合,得到高熵非晶合金增强铝基复合材料的原始粉末;

(3) 采用放电等离子烧结工艺对高熵非晶合金增强铝基复合材料粉末进行烧结,制得铝基复合材料块体,烧结温度需要在高熵非晶合金黏性流动态区间。

2. 根据权利要求1所述黏性流动态高熵非晶合金增强铝基复合材料的制备方法,其特征在于,步骤(1)中,所述Mg、Al、Zn、Cu、Ti、Cr、Mn、Ni金属单质粉末的原子百分比均在15at%~35at%之间。

3. 根据权利要求1所述黏性流动态高熵非晶合金增强铝基复合材料的制备方法,其特征在于,步骤(1)中,所述粉末混合与球磨都在同一球磨罐中进行,整个过程都在氩气氛围保护下进行,混合后不取出粉末直接进行球磨;混粉时转速为50~150r/min,时间为1~2.5h;球磨时转速为250~400r/min,时间为20~60h,球料比为(8~15):1。

4. 根据权利要求1所述黏性流动态高熵非晶合金增强铝基复合材料的制备方法,其特征在于,步骤(2)中,所述高熵非晶合金粉末最大粒径在50~100 $\mu$ m。

5. 根据权利要求1所述黏性流动态高熵非晶合金增强铝基复合材料的制备方法,其特征在于,步骤(2)中,所述高熵非晶合金增强铝基复合材料粉末中,高熵非晶合金粉末增强体所占的体积分数为1~40vol%。

6. 根据权利要求1所述黏性流动态高熵非晶合金增强铝基复合材料的制备方法,其特征在于,步骤(2)中,所述高熵非晶增强体粉末与铝合金基体粉末在行星球磨机中进行混合,粉末混合时球磨罐中的球料比为(4~8):1,球磨时间为5~8h,转速为50~150r/min。

7. 根据权利要求1所述黏性流动态高熵非晶合金增强铝基复合材料的制备方法,其特征在于,步骤(2)中,所述高熵非晶合金增强体粉末与铝合金基体粉末在行星球磨机中进行混合的操作中,混粉过程在氩气氛围保护下进行。

8. 根据权利要求1所述黏性流动态高熵非晶合金增强铝基复合材料的制备方法,其特征在于,步骤(3)中,所述烧结过程中所用的模具为石墨模具或耐热钢。

9. 根据权利要求1所述黏性流动态高熵非晶合金增强铝基复合材料的制备方法,其特征在于,步骤(3)中,所述升温速率为80~120 $^{\circ}$ C/min,烧结温度为400~550 $^{\circ}$ C,保温时间为5~25min,烧结压力为25~60MPa。

10. 权利要求1~9任一项所述制备方法制备得到黏性流动态高熵非晶合金增强铝基复合材料。

## 一种黏性流动态高熵非晶合金增强铝基复合材料及其制备方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于金属新材料技术领域,具体涉及一种高强度、高致密度、低密度的铝基复合材料及其制备方法。

### 背景技术

[0002] 在颗粒增强铝基复合材料的研究中,可以通过改变增强体颗粒的类型、形貌特征、内部结构等方式对复合材料的性能做出调控,使得铝基复合材料表现出高强度、高耐磨性、良好的导热导电性、良好的尺寸稳定性等特点。常见的颗粒增强体有SiC、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiC、AlN等陶瓷颗粒,近些年由于高熵合金和非晶合金的快速发展也逐渐出现了一些以高熵合金颗粒和非晶合金颗粒为增强体的复合材料。

[0003] 非晶合金具有短程有序、长程无序的结构特点,在结构上不具有晶体常见的晶格畸变、晶界、亚晶界等缺陷。这种特殊的结构使得非晶合金在宏观上表现出高强度、高模量、高耐腐蚀性等特点。非晶合金在玻璃化转变温度 $T_g$ 和晶化温度 $T_x$ 之间存在一个过冷液相区,该过冷液相区内材料呈现出超塑性以及黏性流动行为。非晶合金在过冷液相区内随着温度升高,黏性会下降,在宏观上能表现出拉伸超塑性。2011年,中科院汪卫华院士团队(Gao X Q,Zhao K,Ke H B et al.Journal of Non-Crystalline Solids[J],2011,357(21):3557)首先提出了高熵非晶的概念,并制备出室温条件下就能表现出均匀流变行为且具有优异的抗腐蚀性的Sr<sub>20</sub>Ca<sub>20</sub>Yb<sub>20</sub>Mg<sub>20</sub>Zn<sub>20</sub>、Sr<sub>20</sub>Ca<sub>20</sub>Yb<sub>20</sub>Mg<sub>20</sub>Zn<sub>10</sub>Cu<sub>10</sub>、Sr<sub>20</sub>Ca<sub>20</sub>Yb<sub>20</sub>Zn<sub>20</sub>(Li<sub>0.55</sub>Mg<sub>0.45</sub>)<sub>20</sub>高熵非晶合金。高熵非晶合金由于其成分的多样性,在力学性能、玻璃化转变温度、过冷液相区上与少组元的非晶合金相比存在较大的不同。

[0004] 高熵非晶合金在过冷液相区具有黏流态特性,基于这种特性开发一系列过冷液相区与粉末冶金烧结温度相匹配的高熵非晶合金。将该系列高熵非晶合金作为铝基复合材料的增强体,在烧结过程中通过增加压力对增强体进行挤压,在过冷液相区间的高熵非晶合金受压发生黏性流动,形成了独特的非连续网状结构,该结构提高了铝基复合材料的强度、塑性和致密度。

### 发明内容

[0005] 本发明的首要目的是通过机械合金化的方式制备在铝基复合材料烧结温度内处于黏性流动态的高熵非晶合金增强体颗粒,该增强体颗粒的过冷液相区(黏性流动态)需要与粉末冶金制备铝基复合材料的烧结温度区间重合,即在相关烧结温度内高熵非晶合金增强体颗粒能表现出黏性流动的特性。处于黏性流动态的高熵非晶合金在受到挤压时会向外黏性流动到基体颗粒的周围,形成非连续的网状结构,既提高了复合材料的强度也提高了塑性。该特殊结构使本发明中所制备的铝基复合材料具有高强度、高塑性、高致密度、低密度等优良性能。

[0006] 本发明的另外一个目的是提供一种黏性流动态高熵非晶合金增强铝基复合材料

的制备方法。该方法通过放电等离子烧结制得高熵非晶合金增强铝基复合材料。

[0007] 本发明目的通过以下技术方案实现：

[0008] 一种黏性流动态高熵非晶合金增强铝基复合材料的制备方法，包括以下步骤：

[0009] (1) 按对应的成分配比要求称取Mg、Al、Zn、Cu、Ti、Cr、Mn、Ni中的4~6种金属单质粉末，将粉末置于球磨机中；先低转速混粉后高转速高能球磨，通过机械合金化的方式制得高熵非晶合金粉末；

[0010] (2) 将高熵非晶合金粉末与1xxx~7xxx系铝合金粉末按所需成分配比在行星球磨机中进行均匀混合，得到高熵非晶合金增强铝基复合材料的原始粉末；

[0011] (3) 采用放电等离子烧结工艺对高熵非晶合金增强铝基复合材料粉末进行烧结，制得铝基复合材料块体，烧结温度需要在高熵非晶合金黏性流动态区间。

[0012] 上述方法中，步骤(1)中，所述Mg、Al、Zn、Cu、Ti、Cr、Mn、Ni金属单质粉末的原子百分比均在15at%~35at%之间。

[0013] 上述方法中，步骤(1)中，所述粉末混合与球磨都在同一球磨罐中进行，整个过程都在氩气氛围保护下进行，混合后不取出粉末直接进行球磨；混粉时转速为50~150r/min，时间为1~2.5h；球磨时转速为250~400r/min，时间为20~60h，球料比为(8~15):1。

[0014] 上述方法中，步骤(2)中，所述高熵非晶合金粉末最大粒径在50~100 $\mu\text{m}$ 。

[0015] 上述方法中，步骤(2)中，所述高熵非晶合金增强铝基复合材料粉末中，高熵非晶合金粉末增强体所占的体积分数为1~40vol%。

[0016] 上述方法中，步骤(2)中，所述高熵非晶增强体粉末与铝合金基体粉末在行星球磨机中进行混合，粉末混合时球磨罐中的球料比为(4~8):1，球磨时间为5~8h，转速为50~150r/min。

[0017] 上述方法中，步骤(2)中，所述高熵非晶增强体粉末与铝合金基体粉末在行星球磨机中进行混合，混粉过程在氩气氛围保护下进行。

[0018] 上述方法中，步骤(3)中，所述烧结过程中所用的模具为石墨模具或耐热钢。

[0019] 上述方法中，步骤(3)中，所述升温速率为80~120 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，烧结温度为400~550 $^{\circ}\text{C}$ ，保温时间为5~25min，烧结压力为25~60MPa。

[0020] 本发明所得到的铝基复合材料在加压烧结过程中高熵非晶合金颗粒增强体受挤压发生黏性流动，非晶增强体的形貌由颗粒状结构被挤成非连续网状结构。实验表明该非连续网状结构能提高复合材料的抗压强度和塑性。经对比分析存在以下三个原因。

[0021] (1) 均匀分布的非连续网状结构对裂纹的扩展有一定阻碍作用。

[0022] (2) 受挤压后发生黏性流动的高熵非晶合金与铝合金基体颗粒的接触表面积增大，所形成扩散层的面积增大。扩散层是基体与增强体之间载荷传递的载体。

[0023] (3) 挤压后的高熵非晶合金形状发生变化，增强体与基体之间的相互嵌入互锁作用得到加强，实现了一种良好的机械绞合状态。

[0024] 与现在常见的颗粒增强铝基复合材料相比，本发明具有以下优点及有益效果：

[0025] (1) 本发明开发了一种新的铝基复合材料的制备方式，把在铝基复合材料烧结温度内处于黏性流动态的高熵非晶合金颗粒做为增强体，非晶颗粒受挤压变形形成独特的非连续网状结构增强体，提高了复合材料的强度和塑性。

[0026] (2) 本发明所制备的高熵非晶合金增强体在430 $^{\circ}\text{C}$ 到625 $^{\circ}\text{C}$ 之间处于黏性流动状

态,该高熵非晶合金增强体同样可以应用在其他相似烧结温度区间的复合材料中。

[0027] (3) 本发明所制备的高熵非晶合金增强体密度较低,在 $3.5\sim 6\text{g}/\text{cm}^3$ 之间,所制备的高熵非晶增强铝基复合材料具有低密度的特点。

[0028] (4) 本发明采用放电等离子烧结制备复合材料块体,放电等离子烧结工艺具有快速升温的特点,能够使高熵非晶合金增强体快速到达黏性流动状态,有利于非连续网状结构的形成。

[0029] (5) 本发明中黏性流动的高熵非晶合金能快速填满粉末之间堆叠形成的空腔,提高了材料的致密性,致密度能达到 $98.5\%\sim 99.2\%$ 。

## 附图说明

[0030] 图1为实施例1步骤一所得高熵非晶合金粉体的XRD图。

[0031] 图2为实施例1步骤一所得高熵非晶合金粉体的DSC图。

[0032] 图3为实施例1步骤三所得到的黏性流动态高熵非晶合金增强铝基复合材料的扫描电镜图(SEM),放大倍率为1000倍。

[0033] 图4为实施例1步骤三所得到的高熵非晶合金增强体在不发生黏性流动到发生黏性流动的温度梯度之间铝基复合材料形貌的扫描电镜(SEM)图。

[0034] 图5为实施例1步骤三所得到的高熵非晶合金增强体在不发生黏性流动到发生黏性流动的温度梯度之间铝基复合材料形貌的扫描电镜(SEM)图。

[0035] 图6为实施例1步骤三所得到的高熵非晶合金增强体在不发生黏性流动到发生黏性流动的温度梯度之间铝基复合材料形貌的扫描电镜(SEM)图。

[0036] 图7为实施例1步骤三所得到的高熵非晶合金增强体在不发生黏性流动到发生黏性流动的温度梯度之间铝基复合材料形貌的扫描电镜(SEM)图。

[0037] 图8为实施例1步骤三所得到的高熵非晶合金增强体在不发生黏性流动到发生黏性流动的温度梯度之间烧结后得到的铝基复合材料的力学性能对比图。

## 具体实施方式

[0038] 下面结合实施例和附图对本发明作进一步详细的描述,但本发明的实施方式不限于此。

[0039] 本申请实施例中所用原料均可从商业渠道获得。

[0040] 实施例1

[0041] 步骤一:高熵非晶合金的成分设计,机械合金化制备MgAlZnCu高熵非晶合金粉末

[0042] 设计了MgAlZnCu高熵非晶合金,其理论密度为 $5.14\text{g}/\text{cm}^3$ ,在该体系高熵非晶合金中Mg、Al、Zn、Cu四种元素的原子百分比均为 $25\text{at}\%$ ,以粉末总量为 $300\text{g}$ 分别计算各成分的质量为Mg粉 $40.47\text{g}$ 、Al粉 $44.91\text{g}$ 、Zn粉 $108.84\text{g}$ 、Cu粉 $105.78\text{g}$ ,用电子天平称取相应质量。将粉末装在球磨罐中,放入 $3000\text{g}$ 的不锈钢珠,通入氩气保护。在行星球磨机先以 $100\text{r}/\text{min}$ 的转速混粉 $1\text{h}$ ,然后调整转速到 $350\text{r}/\text{min}$ 高能球磨 $40\text{h}$ 。机械合金化完成后,在氩气保护的手套箱中将球磨罐中的粉末取出并对装粉的试剂瓶套上真空袋密封(避免吸水或氧化),获得MgAlZnCu高熵非晶合金粉末。

[0043] 步骤二:MgAlZnCu高熵非晶合金粉末与6061Al合金粉末的均匀混合

[0044] 将步骤一中所制得的MgAlZnCu高熵非晶合金粉末过筛网,得到最大粒径为50 $\mu$ m的MgAlZnCu高熵非晶合金粉末,将其作为增强体粉末制备体积分数为10vol%的高熵非晶合金增强6061Al合金粉末。按照总量为100g的铝基复合材料粉末计算,需要MgAlZnCu粉末17.22g,6061Al合金粉末82.78g。用电子天平称取相应质量,将粉末装在球磨罐中,放入600g的不锈钢珠,通入氩气保护,在行星球磨机上以100r/min转速混粉5h至混合均匀。

[0045] 步骤三:放电等离子烧结制备黏流态高熵非晶合金增强6061Al基复合材料

[0046] 将步骤二得到的高熵非晶合金增强铝基复合材料粉末装入石墨模具中,然后通过放电等离子烧结设备对粉末进行加压烧结。烧结参数如下:升温速率为80 $^{\circ}$ C/min,烧结温度为500 $^{\circ}$ C,保温时间为5min,烧结压力为50MPa。

[0047] 烧结完成后随炉冷却至室温脱模,获得黏流态高熵非晶合金增强6061Al基复合材料。抗压强度达到765MPa,屈服强度达到192MPa,压缩率达到27.2%。

[0048] 本实施例步骤一所得到的MgAlZnCu高熵非晶合金粉末的XRD如图1所示。在球磨40h后,XRD图谱中已经没有晶体峰,而是出现了非晶合金典型的漫散峰(馒头峰)。图2的MgAlZnCu粉末的DSC曲线中出现的晶化峰也证明MgAlZnCu粉末为高熵非晶合金粉末,其中玻璃化温度 $T_g$ 为430 $^{\circ}$ C,晶化温度 $T_x$ 为640 $^{\circ}$ C,两个温度区间为过冷液相区,高熵非晶合金在该温度区间会表现出黏性流动态。本实施例步骤三得到的黏流态非晶增强6061铝基复合材料的形貌如图3所示,其中非晶合金有明显受挤压发生黏性流动的形貌,形成了均匀分布的非连续网状结构。图4~图7为不发生黏性流动( $T < T_g$ )到发生黏性流动( $T_g < T < T_x$ )的温度梯度之间非晶形貌的SEM对比图。图4(425 $^{\circ}$ C)、图5(450 $^{\circ}$ C)、图6(475 $^{\circ}$ C)、图7(500 $^{\circ}$ C)的温度逐渐上升,其中图4的样品烧结温度小于玻璃化转变温度,图5样品烧结温度略高于晶化温度。对比分析可以看出随着温度升高,黏度下降,流动性上升,非晶颗粒受到挤压流动的情况变得更加明显。图8为图4~图7中四组样品的压缩曲线,其中500 $^{\circ}$ C烧结样品的抗压强度与塑性都是四组中最高。

[0049] 实施例2

[0050] 步骤一:高熵非晶合金的成分设计,机械合金化制备Mg<sub>35</sub>Al<sub>25</sub>Zn<sub>20</sub>Cu<sub>20</sub>高熵非晶合金粉末

[0051] 设计了Mg<sub>35</sub>Al<sub>25</sub>Zn<sub>20</sub>Cu<sub>20</sub>高熵非晶合金,其理论密度为4.50g/cm<sup>3</sup>,在该体系高熵非晶合金中Mg、Al、Zn、Cu四种元素的原子百分比分别为35at%、25at%、20at%、20at%,以粉末总量为300g分别计算各成分的质量为Mg粉62.19g、Al粉49.30g、Zn粉95.62g、Cu粉92.90g,用电子天平称取相应质量。将粉末装在球磨罐中,放入4000g的不锈钢珠,通入氩气保护。在行星球磨机上先以150r/min的转速混粉1.5h,然后调整转速到400r/min高能球磨50h。机械合金化完成后,在氩气保护的手套箱中将球磨罐中的粉末取出并对装粉的试剂瓶套上真空袋密封(避免吸水或氧化),获得Mg<sub>35</sub>Al<sub>25</sub>Zn<sub>20</sub>Cu<sub>20</sub>高熵非晶合金粉末。

[0052] 步骤二:Mg<sub>35</sub>Al<sub>25</sub>Zn<sub>20</sub>Cu<sub>20</sub>高熵非晶合金粉末与5083Al合金粉末的均匀混合

[0053] 将步骤一中所制得的Mg<sub>35</sub>Al<sub>25</sub>Zn<sub>20</sub>Cu<sub>20</sub>高熵非晶合金粉末过筛网,得到最大粒径为60 $\mu$ m的Mg<sub>35</sub>Al<sub>25</sub>Zn<sub>20</sub>Cu<sub>20</sub>高熵非晶合金粉末,将其做为增强体粉末制备体积分数为10vol%的高熵非晶合金增强5083Al合金粉末。按照总量为100g的铝基复合材料粉末计算,需要Mg<sub>35</sub>Al<sub>25</sub>Zn<sub>20</sub>Cu<sub>20</sub>粉末17.22g,5083Al合金粉末82.78g。用电子天平称取相应质量,将粉末装在球磨罐中,放入600g的不锈钢珠,通入氩气保护,在行星球磨机上以100r/min转速混粉6h

至混合均匀。

[0054] 步骤三:放电等离子烧结制备黏流态高熵非晶合金增强5083Al基复合材料

[0055] 将步骤二得到的高熵非晶合金增强铝基复合材料粉末装入石墨模具中,然后通过放电等离子烧结设备对粉末进行加压烧结。烧结参数如下:升温速率为120℃/min,烧结温度为520℃,保温时间为10min,烧结压力为40MPa。

[0056] 烧结完成后随炉冷却至室温脱模,获得黏流态高熵非晶合金增强5083Al基复合材料。抗压强度达到642MPa,屈服强度达到210MPa,压缩率达到29.2%。

[0057] 实施例3

[0058] 步骤一:高熵非晶合金的成分设计,机械合金化制备 $\text{Al}_{35}\text{Mg}_{25}\text{Cu}_{25}\text{Zn}_{15}$ 高熵非晶合金粉末

[0059] 设计了 $\text{Al}_{35}\text{Mg}_{25}\text{Cu}_{25}\text{Zn}_{15}$ 高熵非晶合金,其理论密度为 $4.69\text{g}/\text{cm}^3$ ,在该体系高熵非晶合金中Al、Mg、Cu、Zn四种元素的原子百分比分别为35at%、25at%、25at%、15at%,以粉末总量为300g分别计算各成分的质量为Al粉68.73g、Mg粉44.22g、Cu粉115.65g、Zn粉71.40g,用电子天平称取相应质量。将粉末装在球磨罐中,放入2400g的不锈钢珠,通入氩气保护。在行星球磨机上先以60r/min的转速混粉2h,然后调整转速到400r/min高能球磨60h。机械合金化完成后,在氩气保护的手套箱中将球磨罐中的粉末取出并对装粉的试剂瓶套上真空袋密封(避免吸水或氧化),获得 $\text{Al}_{35}\text{Mg}_{25}\text{Cu}_{25}\text{Zn}_{15}$ 高熵非晶合金粉末。

[0060] 步骤二: $\text{Al}_{35}\text{Mg}_{25}\text{Cu}_{25}\text{Zn}_{15}$ 高熵非晶合金粉末与7075Al合金粉末的均匀混合

[0061] 将步骤一中所制得的 $\text{Al}_{35}\text{Mg}_{25}\text{Cu}_{25}\text{Zn}_{15}$ 高熵非晶合金粉末过筛网,得到最大粒径为80 $\mu\text{m}$ 的 $\text{Al}_{35}\text{Mg}_{25}\text{Cu}_{25}\text{Zn}_{15}$ 高熵非晶合金粉末,将其做为增强体粉末制备体积分数为25vol%的高熵非晶合金增强7075Al合金粉末。按照总量为100g的铝基复合材料粉末计算,需要 $\text{Al}_{35}\text{Mg}_{25}\text{Cu}_{25}\text{Zn}_{15}$ 粉末35.75g,7075Al合金粉末64.25g。

[0062] 用电子天平称取相应质量,将粉末装在球磨罐中,放入650g的不锈钢珠,通入氩气保护,在行星球磨机上以110r/min转速混粉6h至混合均匀。

[0063] 步骤三:放电等离子烧结制备黏流态高熵非晶合金增强7075Al基复合材料

[0064] 将步骤二得到的非晶增强铝基复合材料粉末装入石墨模具中,然后通过放电等离子烧结设备对粉末进行加压烧结。烧结参数如下:升温速率为90℃/min,烧结温度为510℃,保温时间为5min,烧结压力为55MPa。

[0065] 烧结完成后随炉冷却至室温脱模,获得黏流态高熵非晶合金增强7075Al基复合材料。抗压强度达到844MPa,屈服强度达到295MPa,压缩率达到15.8%。

[0066] 实施例4

[0067] 步骤一:高熵非晶合金的成分设计,机械合金化制备 $\text{Al}_{30}\text{Mg}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Zn}_{15}\text{Ti}_{15}$ 高熵非晶合金粉末

[0068] 设计了 $\text{Al}_{30}\text{Mg}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Zn}_{15}\text{Ti}_{15}$ 高熵非晶合金,其理论密度为 $4.70\text{g}/\text{cm}^3$ ,在该体系高熵非晶合金中Al、Mg、Cu、Zn、Ti四种元素的原子百分比分别为30at%、20at%、20at%、15at%、15at%,以粉末总量为300g分别计算各成分的质量为Al粉56.93g、Mg粉34.19g、Cu粉89.39g、Zn粉68.98g、Ti粉50.51g,用电子天平称取相应质量。将粉末装在球磨罐中,放入4500g的不锈钢珠,通入氩气保护。在行星球磨机上先以50r/min的转速混粉2.5h,然后调整转速到380r/min高能球磨60h。机械合金化完成后,在氩气保护的手套箱中将球磨罐中的粉

末取出并对装粉的试剂瓶套上真空袋密封(避免吸水或氧化),获得 $\text{Al}_{30}\text{Mg}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Zn}_{15}\text{Ti}_{15}$ 高熵非晶合金粉末。

[0069] 步骤二: $\text{Al}_{30}\text{Mg}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Zn}_{15}\text{Ti}_{15}$ 高熵非晶合金粉末与2024Al合金粉末的均匀混合

[0070] 将步骤一中所制得的 $\text{Al}_{30}\text{Mg}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Zn}_{15}\text{Ti}_{15}$ 高熵非晶合金粉末过筛网,得到最大粒径为 $100\mu\text{m}$ 的 $\text{Al}_{30}\text{Mg}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Zn}_{15}\text{Ti}_{15}$ 高熵非晶合金粉末,将其做为增强体粉末制备体积分数为40vol%的高熵非晶合金增强2024Al合金粉末。按照总量为100g的铝基复合材料粉末计算,需要 $\text{Al}_{30}\text{Mg}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Zn}_{15}\text{Ti}_{15}$ 粉末53.44g,2024Al合金粉末46.56g。用电子天平称取相应质量,将粉末装在球磨罐中,放入800g的不锈钢珠,通入氩气保护,在行星球磨机上以140r/min转速混粉8h至混合均匀。

[0071] 步骤三:放电等离子烧结制备黏流态高熵非晶合金增强2024Al基复合材料

[0072] 将步骤二得到的高熵非晶合金增强铝基复合材料粉末装入石墨模具中,然后通过放电等离子烧结设备对粉末进行加压烧结。烧结参数如下:升温速率为 $80^\circ\text{C}/\text{min}$ ,烧结温度为 $530^\circ\text{C}$ ,保温时间为18min,烧结压力为35MPa。

[0073] 烧结完成后随炉冷却至室温脱模,获得黏流态高熵非晶合金增强2024Al基复合材料。抗压强度达到896MPa,屈服强度达到314MPa,压缩率达到9.8%。

[0074] 实施例5

[0075] 步骤一:高熵非晶合金的成分设计,机械合金化制备 $\text{Cu}_{25}\text{Zn}_{25}\text{Al}_{20}\text{Mg}_{15}\text{Cr}_{15}$ 高熵非晶合金粉末

[0076] 设计了 $\text{Cu}_{25}\text{Zn}_{25}\text{Al}_{20}\text{Mg}_{15}\text{Cr}_{15}$ 高熵非晶合金,其理论密度为 $5.90\text{g}/\text{cm}^3$ ,在该体系高熵非晶合金中Cu、Zn、Al、Mg、Cr五种元素的原子百分比分别为25at%、25at%、20at%、15at%、15at%,以粉末总量为300g分别计算各成分的质量为Cu粉97.12g、Zn粉99.93g、Al粉32.99g、Mg粉22.29g、Cr粉47.68g,用电子天平称取相应质量。将粉末装在球磨罐中,放入3800g的不锈钢珠,通入氩气保护。在行星球磨机上先以90r/min的转速混粉2h,然后调整转速到400r/min高能球磨60h。机械合金化完成后,在氩气保护的手套箱中将球磨罐中的粉末取出并对装粉的试剂瓶套上真空袋密封(避免吸水或氧化),获得 $\text{Cu}_{25}\text{Zn}_{25}\text{Al}_{20}\text{Mg}_{15}\text{Cr}_{15}$ 高熵非晶合金粉末。

[0077] 步骤二: $\text{Cu}_{25}\text{Zn}_{25}\text{Al}_{20}\text{Mg}_{15}\text{Cr}_{15}$ 高熵非晶合金粉末与3005Al合金粉末的均匀混合

[0078] 将步骤一中所制得的 $\text{Cu}_{25}\text{Zn}_{25}\text{Al}_{20}\text{Mg}_{15}\text{Cr}_{15}$ 高熵非晶合金粉末过筛网,得到最大粒径为 $50\mu\text{m}$ 的 $\text{Cu}_{25}\text{Zn}_{25}\text{Al}_{20}\text{Mg}_{15}\text{Cr}_{15}$ 高熵非晶合金粉末,将其做为增强体粉末制备体积分数为5vol%的高熵非晶合金增强3005Al合金粉末。按照总量为100g的铝基复合材料粉末计算,需要 $\text{Cu}_{25}\text{Zn}_{25}\text{Al}_{20}\text{Mg}_{15}\text{Cr}_{15}$ 粉末10.25g,3005Al合金粉末89.75g。用电子天平称取相应质量,将粉末装在球磨罐中,放入800g的不锈钢珠,通入氩气保护,在行星球磨机上以140r/min转速混粉8h至混合均匀。用电子天平称取相应质量,将粉末装在球磨罐中,放入400g的不锈钢珠,通入氩气保护,在行星球磨机上以120r/min转速混粉7h至混合均匀。

[0079] 步骤三:放电等离子烧结制备黏流态高熵非晶合金增强3005Al基复合材料

[0080] 将步骤二得到的高熵非晶合金增强铝基复合材料粉末装入石墨模具中,然后通过放电等离子烧结设备对粉末进行加压烧结。烧结参数如下:升温速率为 $110^\circ\text{C}/\text{min}$ ,烧结温度为 $530^\circ\text{C}$ ,保温时间为15min,烧结压力为25MPa。

[0081] 烧结完成后随炉冷却至室温脱模,获得黏流态高熵非晶合金增强3005Al基复合材



料。抗压强度达到425MPa,屈服强度达到187MPa,压缩率达到32.4%。

[0082] 实施例6

[0083] 步骤一:高熵非晶合金的成分设计,机械合金化制备 $\text{Al}_{25}\text{Mg}_{20}\text{Zn}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Ni}_{15}$ 高熵非晶合金粉末

[0084] 设计了 $\text{Al}_{25}\text{Mg}_{20}\text{Zn}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Ni}_{15}$ 高熵非晶合金,其理论密度为 $5.58\text{g}/\text{cm}^3$ ,在该体系高熵非晶合金中Al、Mg、Zn、Cu、Ni五种元素的原子百分比分别为25at%、20at%、20at%、20at%、15at%,以粉末总量为300g分别计算各成分的质量为Al粉43.80g、Mg粉31.57g、Zn粉84.93g、Cu粉82.53g、Ni粉57.14g,用电子天平称取相应质量。将粉末装在球磨罐中,放入4200g的不锈钢珠,通入氩气保护。在行星球磨机先以60r/min的转速混粉2h,然后调整转速到330r/min高能球磨45h。机械合金化完成后,在氩气保护的手套箱中将球磨罐中的粉末取出并对装粉的试剂瓶套上真空袋密封(避免吸水或氧化),获得 $\text{Al}_{25}\text{Mg}_{20}\text{Zn}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Ni}_{15}$ 高熵非晶合金粉末。

[0085] 步骤二: $\text{Al}_{25}\text{Mg}_{20}\text{Zn}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Ni}_{15}$ 高熵非晶合金粉末与7050Al合金粉末的均匀混合

[0086] 将步骤一中所制得的 $\text{Al}_{25}\text{Mg}_{20}\text{Zn}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Ni}_{15}$ 高熵非晶合金粉末过筛网,得到最大粒径为 $75\mu\text{m}$ 的 $\text{Al}_{25}\text{Mg}_{20}\text{Zn}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Ni}_{15}$ 高熵非晶合金粉末,将其做为增强体粉末制备体积分数为35vol%的高熵非晶合金增强7050Al合金粉末。按照总量为100g的铝基复合材料粉末计算,需要 $\text{Al}_{25}\text{Mg}_{20}\text{Zn}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Ni}_{15}$ 粉末51.50g,7050Al合金粉末48.50g。用电子天平称取相应质量,将粉末装在球磨罐中,放入600g的不锈钢珠,通入氩气保护,在行星球磨机上以90r/min转速混粉8h至混合均匀。

[0087] 步骤三:放电等离子烧结制备黏流态高熵非晶合金增强7050Al基复合材料

[0088] 将步骤二得到的高熵非晶合金增强铝基复合材料粉末装入石墨模具中,然后通过放电等离子烧结设备对粉末进行加压烧结。烧结参数如下:升温速率为 $80^\circ\text{C}/\text{min}$ ,烧结温度为 $550^\circ\text{C}$ ,保温时间为12min,烧结压力为50MPa。

[0089] 烧结完成后随炉冷却至室温脱模,获得黏流态高熵非晶合金增强7050Al基复合材料。抗压强度达到836MPa,屈服强度达到262MPa,压缩率达到11.9%。

[0090] 实施例7

[0091] 步骤一:高熵非晶合金的成分设计,机械合金化制备 $\text{Cu}_{20}\text{Mg}_{20}\text{Al}_{15}\text{Zn}_{15}\text{Ti}_{15}\text{Mn}_{15}$ 高熵非晶合金粉末

[0092] 设计了 $\text{Cu}_{20}\text{Mg}_{20}\text{Al}_{15}\text{Zn}_{15}\text{Ti}_{15}\text{Mn}_{15}$ 高熵非晶合金,其理论密度为 $5.41\text{g}/\text{cm}^3$ ,在该体系高熵非晶合金中Cu、Mg、Al、Zn、Ti、Mn六种元素的原子百分比分别为20at%、20at%、15at%、15at%、15at%、15at%,以粉末总量为300g分别计算各成分的质量为Cu粉81.39g、Mg粉31.13g、Al粉25.92g、Zn粉62.81g、Ti粉45.99g、Mn粉52.77g,用电子天平称取相应质量。将粉末装在球磨罐中,放入2400g的不锈钢珠,通入氩气保护。在行星球磨机先以70r/min的转速混粉2.5h,然后调整转速到360r/min高能球磨40h。机械合金化完成后,在氩气保护的手套箱中将球磨罐中的粉末取出并对装粉的试剂瓶套上真空袋密封(避免吸水或氧化),获得 $\text{Cu}_{20}\text{Mg}_{20}\text{Al}_{15}\text{Zn}_{15}\text{Ti}_{15}\text{Mn}_{15}$ 高熵非晶合金粉末。

[0093] 步骤二: $\text{Cu}_{20}\text{Mg}_{20}\text{Al}_{15}\text{Zn}_{15}\text{Ti}_{15}\text{Mn}_{15}$ 高熵非晶合金粉末与5005Al合金粉末的均匀混合

[0094] 将步骤一中所制得的 $\text{Cu}_{20}\text{Mg}_{20}\text{Al}_{15}\text{Zn}_{15}\text{Ti}_{15}\text{Mn}_{15}$ 高熵非晶合金粉末过筛网,得到最大粒径为 $90\mu\text{m}$ 的 $\text{Cu}_{20}\text{Mg}_{20}\text{Al}_{15}\text{Zn}_{15}\text{Ti}_{15}\text{Mn}_{15}$ 高熵非晶合金粉末,将其做为增强体粉末制备体积分

数为15vol%的高熵非晶合金增强5005Al合金粉末。按照总量为100g的铝基复合材料粉末计算,需要 $\text{Cu}_{20}\text{Mg}_{20}\text{Al}_{15}\text{Zn}_{15}\text{Ti}_{15}\text{Mn}_{15}$ 粉末26.19g,5005Al合金粉末73.81g。用电子天平称取相应质量,将粉末装在球磨罐中,放入800g的不锈钢珠,通入氩气保护,在行星球磨机上以100r/min转速混粉5h至混合均匀。

[0095] 步骤三:放电等离子烧结制备黏流态高熵非晶合金增强5005Al基复合材料

[0096] 将步骤二得到的高熵非晶合金增强铝基复合材料粉末装入石墨模具中,然后通过放电等离子烧结设备对粉末进行加压烧结。烧结参数如下:升温速率为 $90^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,烧结温度为 $490^{\circ}\text{C}$ ,保温时间为15min,烧结压力为45MPa。

[0097] 烧结完成后随炉冷却至室温脱模,获得黏流态高熵非晶合金增强5005Al基复合材料。抗压强度达到648MPa,屈服强度达到209MPa,压缩率达到20.08%。

[0098] 实施例8

[0099] 步骤一:高熵非晶合金的成分设计,机械合金化制备 $\text{Zn}_{25}\text{Mg}_{15}\text{Al}_{15}\text{Cu}_{15}\text{Ti}_{15}\text{Mn}_{15}$ 高熵非晶合金粉末

[0100] 设计了 $\text{Zn}_{25}\text{Mg}_{15}\text{Al}_{15}\text{Cu}_{15}\text{Ti}_{15}\text{Mn}_{15}$ 高熵非晶合金,其理论密度为 $5.59\text{g}/\text{cm}^3$ ,在该体系非晶合金中Zn、Mg、Al、Cu、Ti、Mn六种元素的原子百分比分别为25at%、15at%、15at%、15at%、15at%、15at%,以粉末总量为300g分别计算各成分的质量为Zn粉100.10g、Mg粉22.32g、Al粉24.78g、Cu粉58.36g、Ti粉43.98g、Mn粉50.46g,用电子天平称取相应质量。将粉末装在球磨罐中,放入3500g的不锈钢珠,通入氩气保护。在行星球磨机上先以80r/min的转速混粉2h,然后调整转速到380r/min高能球磨50h。机械合金化完成后,在氩气保护的手套箱中将球磨罐中的粉末取出并对装粉的试剂瓶套上真空袋密封(避免吸水或氧化),获得 $\text{Zn}_{25}\text{Mg}_{15}\text{Al}_{15}\text{Cu}_{15}\text{Ti}_{15}\text{Mn}_{15}$ 高熵非晶合金粉末。

[0101] 步骤二: $\text{Zn}_{25}\text{Mg}_{15}\text{Al}_{15}\text{Cu}_{15}\text{Ti}_{15}\text{Mn}_{15}$ 高熵非晶合金粉末与4004Al合金粉末的均匀混合

[0102] 将步骤一中所制得的 $\text{Zn}_{25}\text{Mg}_{15}\text{Al}_{15}\text{Cu}_{15}\text{Ti}_{15}\text{Mn}_{15}$ 高熵非晶合金粉末过筛网,得到最大粒径为 $80\mu\text{m}$ 的 $\text{Zn}_{25}\text{Mg}_{15}\text{Al}_{15}\text{Cu}_{15}\text{Ti}_{15}\text{Mn}_{15}$ 高熵非晶合金粉末,将其做为增强体粉末制备体积分数为2vol%的高熵非晶合金增强4004Al合金粉末。按照总量为100g的铝基复合材料粉末计算,需要 $\text{Zn}_{25}\text{Mg}_{15}\text{Al}_{15}\text{Cu}_{15}\text{Ti}_{15}\text{Mn}_{15}$ 粉末4.10g,4004Al合金粉末95.90g。用电子天平称取相应质量,将粉末装在球磨罐中,放入400g的不锈钢珠,通入氩气保护,在行星球磨机上以80r/min转速混粉6h至混合均匀。

[0103] 步骤三:放电等离子烧结制备黏流态高熵非晶合金增强4004Al基复合材料

[0104] 将步骤二得到的高熵非晶合金增强铝基复合材料粉末装入石墨模具中,然后通过放电等离子烧结设备对粉末进行加压烧结。烧结参数如下:升温速率为 $100^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,烧结温度为 $530^{\circ}\text{C}$ ,保温时间为12min,烧结压力为55MPa。

[0105] 烧结完成后随炉冷却至室温脱模,获得黏流态高熵非晶合金增强4004Al基复合材料。抗压强度达到395MPa,屈服强度达到183MPa,压缩率达到48.7%。

[0106] 上述实施例为本发明较佳的实施方式,但本发明的实施方式并不受上述实施例的限制,其他的任何未背离本发明的精神实质与原理下所作的改变、修饰、替代、组合、简化,均应为等效的置换方式,都包含在本发明的保护范围之内。

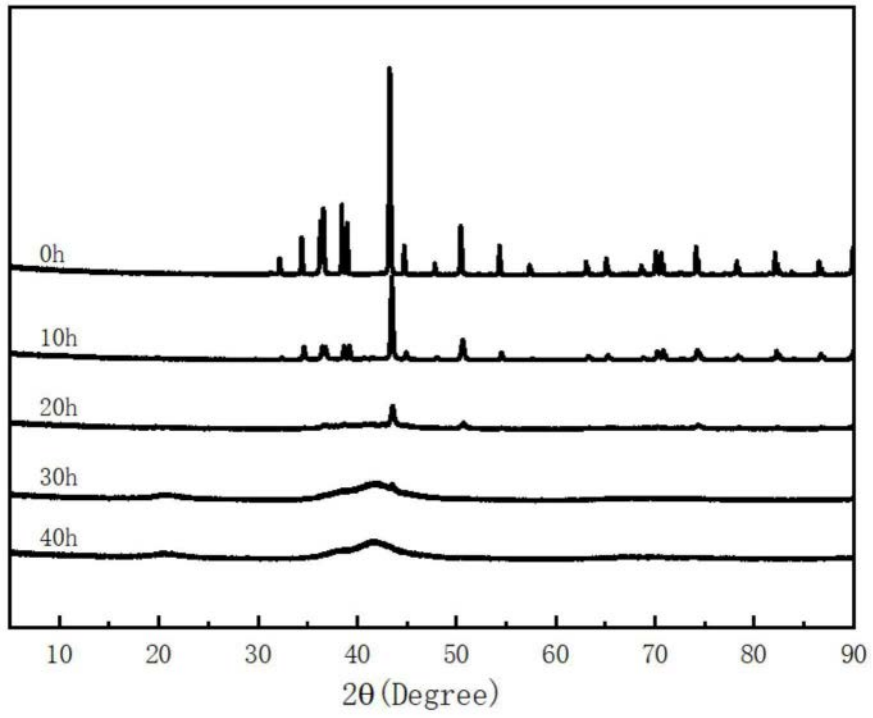


图1

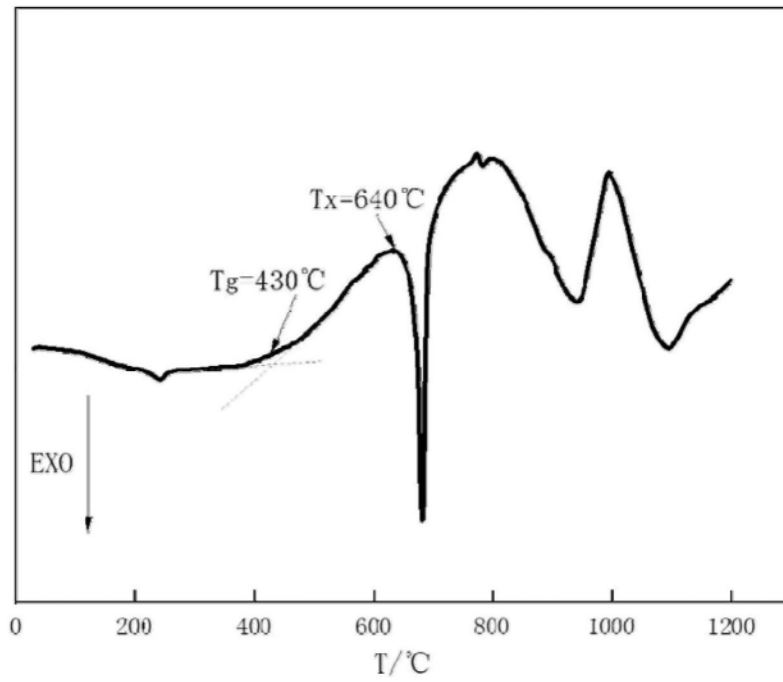


图2

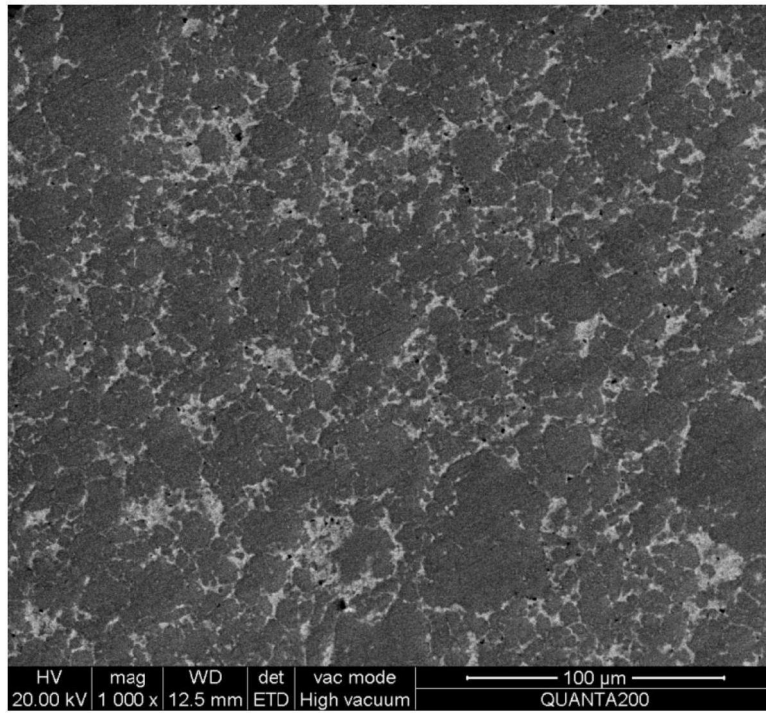


图3

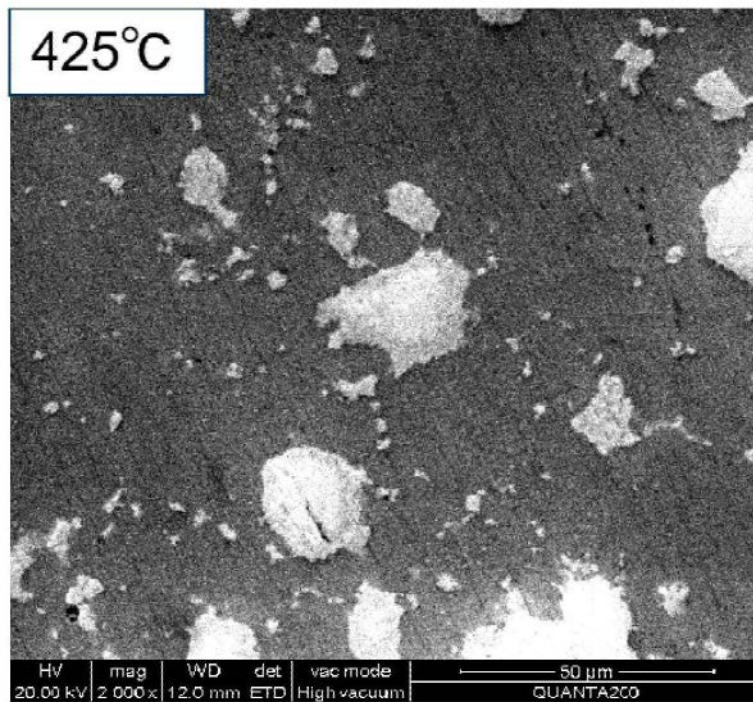


图4



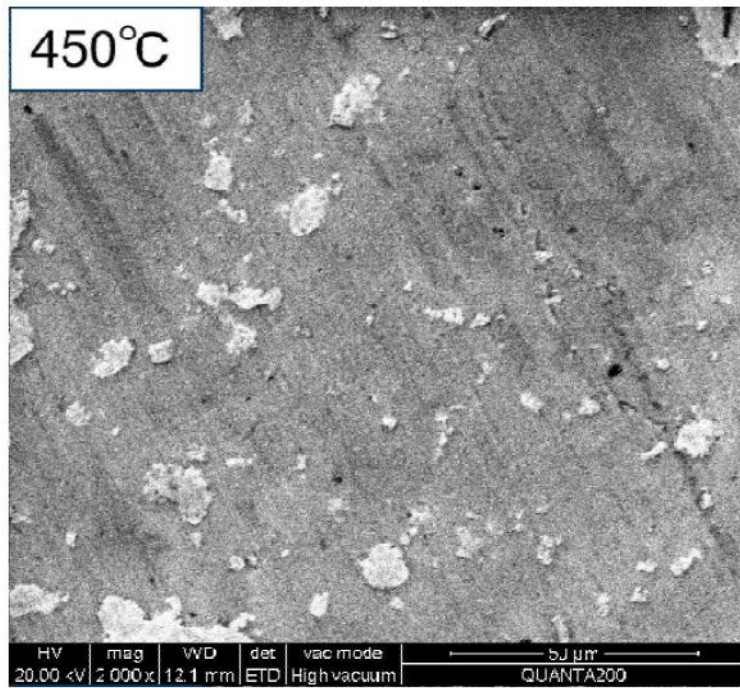


图5

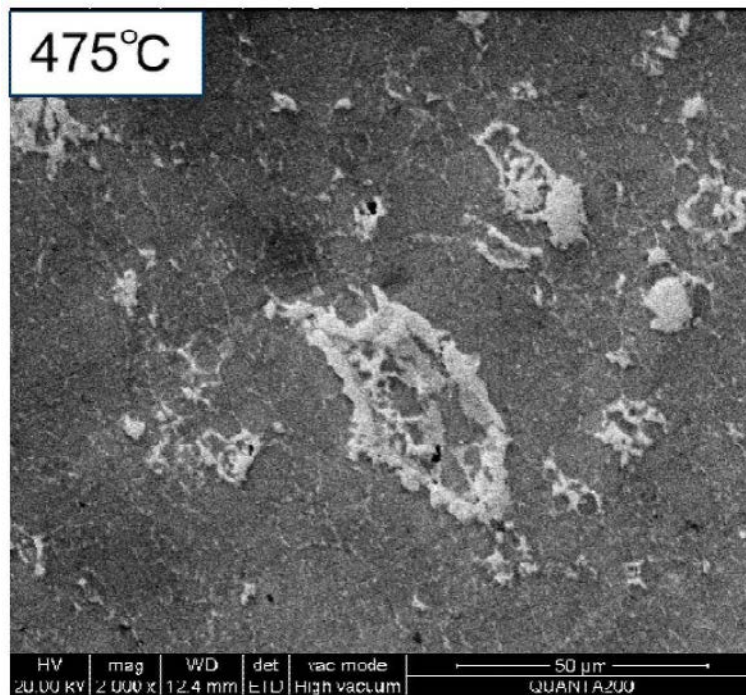


图6

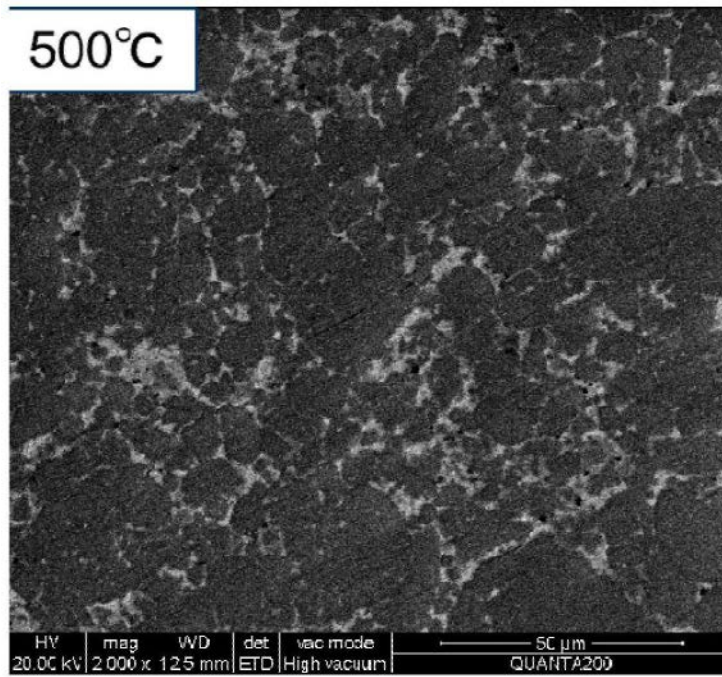


图7

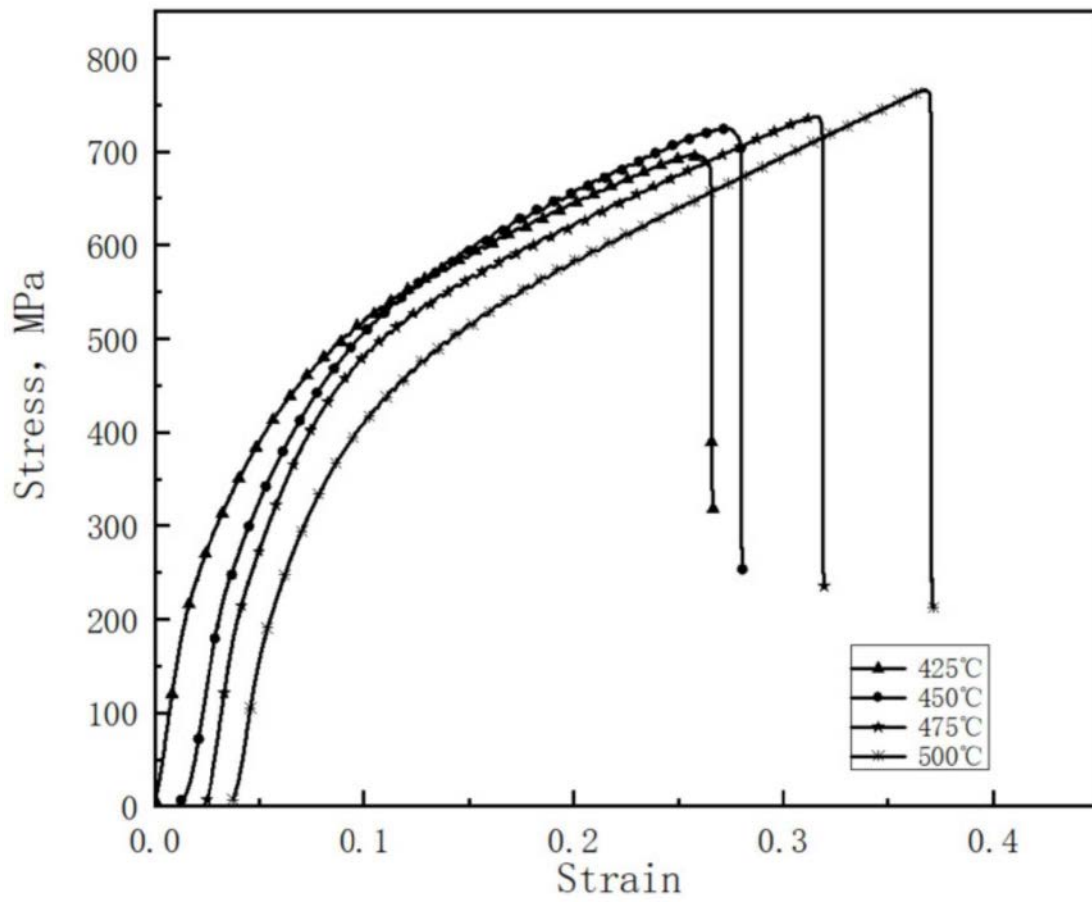


图8