



# (12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110340343 A

(43)申请公布日 2019. 10. 18

(21)申请号 201810305552.1

B22F 3/24(2006.01)

(22)申请日 2018.04.08

B33Y 10/00(2015.01)

B33Y 70/00(2015.01)

(71)申请人 中国航发商用航空发动机有限责任公司

地址 200241 上海市闵行区莲花南路3998号

(72)发明人 付俊 雷力明 付鑫 杨阳 石磊 周新民

(74)专利代理机构 上海专利商标事务所有限公司 31100

代理人 陈亮

(51)Int. Cl.

B22F 1/00(2006.01)

B22F 3/105(2006.01)

B22F 9/14(2006.01)

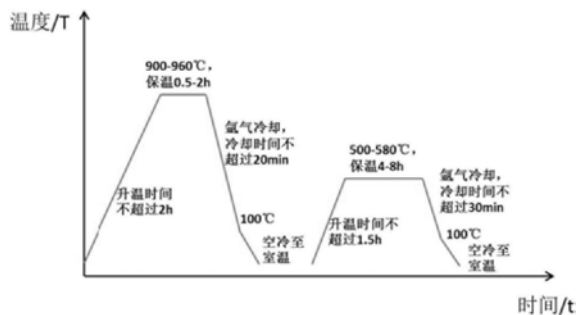
权利要求书2页 说明书7页 附图1页

## (54)发明名称

采用PREP TC4粉末的激光熔化沉积增材制造及热处理方法

## (57)摘要

本发明提供了一种采用PREP TC4粉末的激光熔化沉积增材制造及制件热处理方法,其包括以下步骤:步骤S<sub>1</sub>、选用等离子旋转电极雾化法制备的TC4合金球形粉末,所述TC4合金球形粉末的粉末粒度为45 μm-180 μm;步骤S<sub>2</sub>、利用同步送粉激光增材制造设备对所述TC4合金球形粉末进行LMD成形;步骤S<sub>3</sub>、将成形件置于真空热处理炉中进行固溶时效处理。步骤S<sub>4</sub>、获得制件。本发明采用的PREP TC4(Ti6Al4V)合金球形无空心粉,粉末流动性好,卫星粉含量少,粉末粒度范围窄,能有效避免因空心粉造成的孔隙等缺陷,并且能使成形件的强度达到锻件标准的前提下,室温断裂韧性K<sub>IC</sub>不低于81MN/m<sup>1.5</sup>,100℃高温断裂韧性K<sub>IC</sub>不低于93MN/m<sup>1.5</sup>,超锻件标准。



1. 一种采用PREP TC4粉末的激光熔化沉积增材制造及制件热处理方法,其特征在于,所述方法包括以下步骤:

步骤S<sub>1</sub>、选用超高转速等离子旋转电极雾化法制备的TC4合金球形粉末,所述TC4合金球形粉末的粉末粒度为45 $\mu$ m-180 $\mu$ m;

步骤S<sub>2</sub>、利用同步送粉激光增材制造设备对所述TC4合金球形粉末进行LMD成形;

步骤S<sub>3</sub>、将成形件置于真空热处理炉中进行固溶时效处理。

步骤S<sub>4</sub>、获得制件。

2. 如权利要求1所述的采用PREP TC4粉末的激光熔化沉积增材制造及制件热处理方法,其特征在于,所述步骤S<sub>1</sub>的所述TC4合金球形粉末中粉末粒度小于等于45 $\mu$ m的粉末比例小于等于5%,粉末粒度45 $\mu$ m-180 $\mu$ m的粉末比例大于等于90%,粉末粒度大于等于180 $\mu$ m的粉末比例小于等于5%。

3. 如权利要求2所述的采用PREP TC4粉末的激光熔化沉积增材制造及制件热处理方法,其特征在于,粉末累积粒度分布D<sub>10</sub>≤68 $\mu$ m, D<sub>50</sub>≤116 $\mu$ m, D<sub>90</sub>≤180 $\mu$ m,所述TC4合金球形粉末的流动性小于等于26s/50g。

4. 如权利要求1所述的采用PREP TC4粉末的激光熔化沉积增材制造及制件热处理方法,其特征在于,所述步骤S<sub>2</sub>中所述同步送粉激光增材制造设备的激光功率为1000-3200W,扫描速率为800-1500mm/min,送粉速率为4-28g/min,光斑直径为2-6mm,层厚0.9-2mm,搭接率为30%-50%。

5. 如权利要求1所述的采用PREP TC4粉末的激光熔化沉积增材制造及制件热处理方法,其特征在于,所述步骤S<sub>3</sub>还包括以下步骤S<sub>31</sub>:炉内抽真空至5×10<sup>-3</sup>Pa,随炉升温至900℃-945℃(升温时间不短于2h),保温时间0.5h-2h,通入高纯氩气快速冷却至100℃,冷却时间小于等于20min,再空冷至室温。

6. 如权利要求5所述的采用PREP TC4粉末的激光熔化沉积增材制造及制件热处理方法,其特征在于,所述步骤S<sub>31</sub>还包括以下步骤S<sub>32</sub>:再随炉升温至500℃-580℃(保温时间不短于1.5h),保温时间4h-8h,通入高纯氩气冷却至100℃,冷却时间小于等于30min,再空冷至室温。

7. 如权利要求3所述的采用PREP TC4粉末的激光熔化沉积增材制造及制件热处理方法,其特征在于,所述TC4合金球形粉末中粉末粒度小于等于45 $\mu$ m的粉末比例占3.1%,粉末粒度45 $\mu$ m-180 $\mu$ m的粉末比例占93.2%,粉末粒度大于等于180 $\mu$ m的粉末比例占3.7%;

粉末累积粒度分布D<sub>10</sub>=66.1 $\mu$ m, D<sub>50</sub>=110.4 $\mu$ m, D<sub>90</sub>=169.6 $\mu$ m。粉末流动性24.8s/50g。

8. 如权利要求3所述的采用PREP TC4粉末的激光熔化沉积增材制造及制件热处理方法,其特征在于,所述TC4合金球形粉末中粉末粒度小于等于45 $\mu$ m的粉末比例占2.64%,粉末粒度45 $\mu$ m-180 $\mu$ m的粉末比例占94.6%,粉末粒度大于等于180 $\mu$ m的粉末比例占0.96%;

粉末累积粒度分布D<sub>10</sub>=62.3 $\mu$ m, D<sub>50</sub>=106.9 $\mu$ m, D<sub>90</sub>=171.0 $\mu$ m。粉末流动性25.2s/50g。

9. 如权利要求3所述的采用PREP TC4粉末的激光熔化沉积增材制造及制件热处理方法,其特征在于,所述TC4合金球形粉末中粉末粒度小于等于45 $\mu$ m的粉末比例占3.57%,粉末粒度45 $\mu$ m-180 $\mu$ m的粉末比例占92.4%,粉末粒度大于等于180 $\mu$ m的粉末比例占4.03%;

粉末累积粒度分布 $D_{10}=56.8\mu\text{m}$ , $D_{50}=104.8\mu\text{m}$ , $D_{90}=162.7\mu\text{m}$ 。粉末流动性 $25.8\text{s}/50\text{g}$ 。

10. 如权利要求4所述的采用PREP TC4粉末的激光熔化沉积增材制造及制件热处理方法,其特征在于,所述同步送粉激光增材制造设备的激光功率为1800W,扫描速率为1000mm/min,送粉速率为12g/min,光斑直径为3mm,层厚1mm,搭接率为50%;

或者激光功率为3200W,扫描速率为1500mm/min,送粉速率为22g/min,光斑直径为6mm,层厚1.6mm,搭接率为30%。

或者激光功率为1000W,扫描速率为800mm/min,送粉速率为4g/min,光斑直径为2mm,层厚0.9mm,搭接率为50%。

## 采用PREP TC4粉末的激光熔化沉积增材制造及热处理方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及增材制造技术领域,特别适用于一种采用PREP TC4粉末的激光熔化沉积增材制造及热处理方法。

### 背景技术

[0002] 激光熔化沉积(Laser Melting Deposition,LMD)技术是在快速原型制造(Rapid Prototyping,RP)基础上发展起来的一种先进的增材制造(Additive Manufacturing,AM)技术,增材制造采用高能束将材料熔化逐层累加的方法制造实体零件,激光熔化沉积采用激光将材料熔化逐层堆积的方法制造实体零件。与传统的锻造-机械加工成形技术相比,它具有如下优势:

[0003] 一、材料利用率高,机加工量小;

[0004] 二、生产过程工序少,工艺简单,具有较高的柔性和快速反应能力;

[0005] 三、成形过程无需模具、生产制造成本低,周期短的工艺特点,能极大的满足高熔点、难加工、价格昂贵的金属材料的低成本制造,广泛应用于航空航天、汽车、船舶等领域。

[0006] TC4钛合金因其具有比强度高、耐蚀性好、综合性能优异的特点,在航空航天高端装备制造领域的应用广泛。与传统的锻造-机加制造方法相比,采用同步送粉的激光熔化沉积增材制造制备TC4合金零件,能极大地解决钛合金难加工问题。同时提高了设计的自由度,具有柔性高、材料利用率高的特点。对于大型复杂TC4合金零部件的制备,能有效降低成本、缩短制造周期。而基于同步送粉的激光熔化沉积成形过程所用的金属粉末一般为气雾化法制备的球形粉末,该粉末空心率高,卫星球粉末含量高,粉末球形度不高,流动性较差,使得成形过程中送粉不均、形成孔隙等缺陷,严重时会影响激光熔化沉积增材制造成形件的形状、组织和性能,极大降低零件质量。因此,急需从原材料粉末的性能方面解决增材制造零件的成形质量问题。

[0007] 等离子旋转电极雾化(即合金自耗电极端部经等离子体熔化,在高速离心力和表面张力作用下实现雾化,获得球形粉体)法相较于气雾化法制备的合金粉末其粗粉收得率高,所制备的粉末具有球形度高、流动性好、粒度分布窄、基本无空心/卫星粉、表面清洁度高等优势,能极大满足同步送粉的金属激光增材制造对粉末的要求,但采用等离子旋转电极雾化法制备的TC4合金粉末,通过同步送粉的增材制造缺乏成形工艺、热处理(即通过加热、保温和冷却手段以获得成形件组织和性能的热加工工艺)工艺方法及成形件的性能数据。

[0008] 另一方面,同步送粉的激光增材制造成形过程的温度梯度较高,具有移动的金属小熔池快速凝固的特征,该快速凝固的过程处于一种处于非平衡稳定状态,形成非平衡稳态组织,导致成形的TC4合金内部具有较高的热应力、组织应力和凝固收缩应力,使得成形件在宏观上表现出高强度、低塑性的特点。而钛合金的导热性差,且TC4合金为 $\alpha+\beta$ 双相钛合金,其淬透性差,淬火热应力大,在进行淬火时易发生翘曲变形,引起局部温度过高而形成魏氏组织,影响合金的性能。同时,在进行普通的热处理时,钛合金易与氧和水蒸气发生反

应,在工件表面形成氧化皮,使合金性能变差,而普通热处理炉中的氢气,可能使钛合金因吸氢引起氢脆。

### 发明内容

[0009] 本发明要解决的技术问题是为了克服现有技术中制备TC4合金的方法缺乏成形工艺、热处理工艺及成形件的性能数据等缺陷,提供一种采用PREP TC4粉末的激光熔化沉积增材制造及热处理方法。

[0010] 本发明是通过下述技术方案来解决上述技术问题的:

[0011] 一种采用PREP TC4粉末的激光熔化沉积增材制造及热处理方法,其特点在于,所述方法包括以下步骤:

[0012] 步骤S<sub>1</sub>、选用超高转速等离子旋转电极雾化法制备的TC4合金球形粉末,所述TC4合金球形粉末的粉末粒度为45 $\mu$ m-180 $\mu$ m;

[0013] 步骤S<sub>2</sub>、利用同步送粉激光增材制造设备对所述TC4合金球形粉末进行LMD成形;

[0014] 步骤S<sub>3</sub>、将成形件置于真空热处理炉中进行固溶时效处理。

[0015] 步骤S<sub>4</sub>、获得制件。

[0016] 根据本发明的一个实施例,所述步骤S<sub>1</sub>的所述TC4合金球形粉末中粉末粒度小于等于45 $\mu$ m的粉末比例小于等于5%,粉末粒度45 $\mu$ m-180 $\mu$ m的粉末比例大于等于90%,粉末粒度大于等于180 $\mu$ m的粉末比例小于等于5%。

[0017] 根据本发明的一个实施例,粉末累积粒度分布D<sub>10</sub>≤68 $\mu$ m,D<sub>50</sub>≤116 $\mu$ m,D<sub>90</sub>≤180 $\mu$ m,所述TC4合金球形粉末的流动性小于等于26s/50g。

[0018] 根据本发明的一个实施例,所述步骤S<sub>2</sub>中所述同步送粉激光增材制造设备的激光功率为1000-3200W,扫描速率为800-1500mm/min,送粉速率为

[0019] 4-28g/min,光斑直径为2-6mm,层厚0.9-2mm,搭接率为30%-50%。

[0020] 根据本发明的一个实施例,所述步骤S<sub>3</sub>还包括以下步骤S<sub>31</sub>:炉内抽真空至5×10<sup>-3</sup>Pa,随炉升温至900℃-945℃(升温时间不短于2h),保温时间0.5h-2h,通入高纯氩气快速冷却至100℃,冷却时间小于等于20min,再空冷至室温。

[0021] 根据本发明的一个实施例,所述步骤S<sub>31</sub>还包括以下步骤S<sub>32</sub>:再随炉升温至500℃-580℃(温时间不短于1.5h),保温时间4h-8h,通入高纯氩气冷却至100℃,冷却时间小于等于30min,再空冷至室温。

[0022] 根据本发明的一个实施例,所述TC4合金球形粉末中粉末粒度小于等于45 $\mu$ m的粉末比例占3.1%,粉末粒度45 $\mu$ m-180 $\mu$ m的粉末比例占93.2%,粉末粒度大于等于180 $\mu$ m的粉末比例占3.7%;

[0023] 粉末累积粒度分布D<sub>10</sub>=66.1 $\mu$ m,D<sub>50</sub>=110.4 $\mu$ m,D<sub>90</sub>=169.6 $\mu$ m。粉末流动性24.8s/50g。

[0024] 根据本发明的一个实施例,所述TC4合金球形粉末中粉末粒度小于等于45 $\mu$ m的粉末比例占2.64%,粉末粒度45 $\mu$ m-180 $\mu$ m的粉末比例占94.6%,粉末粒度大于等于180 $\mu$ m的粉末比例占0.96%;

[0025] 粉末累积粒度分布D<sub>10</sub>=62.3 $\mu$ m,D<sub>50</sub>=106.9 $\mu$ m,D<sub>90</sub>=171.0 $\mu$ m。粉末流动性25.2s/50g。

[0026] 根据本发明的一个实施例,所述TC4合金球形粉末中粉末粒度小于等于45 $\mu\text{m}$ 的粉末比例占3.57%,粉末粒度45 $\mu\text{m}$ -180 $\mu\text{m}$ 的粉末比例占92.4%,粉末粒度大于等于180 $\mu\text{m}$ 的粉末比例占4.03%;

[0027] 粉末累积粒度分布 $D_{10}=56.8\mu\text{m}$ , $D_{50}=104.8\mu\text{m}$ , $D_{90}=162.7\mu\text{m}$ 。粉末流动性25.8s/50g。

[0028] 根据本发明的一个实施例,所述同步送粉激光增材制造设备的激光功率为1800W,扫描速率为1000mm/min,送粉速率为12g/min,光斑直径为3mm,层厚1mm,搭接率为50%;

[0029] 或者激光功率为3200W,扫描速率为1500mm/min,送粉速率为22g/min,光斑直径为6mm,层厚1.6mm,搭接率为30%。

[0030] 或者激光功率为1000W,扫描速率为800mm/min,送粉速率为4g/min,光斑直径为2mm,层厚0.9mm,搭接率为50%。

[0031] 本发明的积极进步效果在于:

[0032] 本发明采用PREP TC4粉末的激光熔化沉积增材制造及制件热处理方法具有如下优点:

[0033] 一、本发明将成形件置于真空热处理炉中进行固溶时效处理,避免了制件因普通热处理炉中的氧、水蒸气、氢的影响而导致的表面氧化和氢脆现象,同时采用高纯氩气冷却的方式避免了固溶处理时采用水冷的方式引起的冷却速度过大,而使制件发生翘曲变形,及变形引起的局部温度过高导致形成魏氏组织,降低制件的性能。

[0034] 二、本发明采用的PREP TC4 (Ti6Al4V) 合金球形无空心粉,粉末流动性好,卫星粉含量少,粉末粒度范围窄,能有效避免因空心粉造成的气孔、孔隙等缺陷,以及因粉末流动性差造成的送粉不均给成形过程带来问题。同时还避免了因送粉不均导致的融合不良或未融合缺陷,从粉末原材料性能方面提高成形质量和成形效率,拓宽PREP TC4 (Ti6Al4V) 粉末的应用范围。

[0035] 三、本发明采用PREP TC4 (Ti6Al4V) 合金粉末进行同步送粉的激光增材制造,通过采用上述技术方案的成形工艺及成形件热处理工艺方法,不仅能有效提高TC4合金的成形效率,同时使TC4钛合金制件致密度达99.5%以上,室温拉伸性能达锻件标准,室温断裂韧性 $K_{IC}$ 不低于81 $\text{MN}/\text{m}^{1.5}$ ,100 $^{\circ}\text{C}$ 高温断裂韧性 $K_{IC}$ 不低于93 $\text{MN}/\text{m}^{1.5}$ ,超锻件标准,拓宽了使用PREP Ti6Al4V合金粉末进行同步送粉的激光增材制造所得制件的成形及热处理调控方法,扩大了应用范围。

## 附图说明

[0036] 本发明上述的以及其他的特征、性质和优势将通过下面结合附图和实施例的描述而变的更加明显,在附图中相同的附图标记始终表示相同的特征,其中:

[0037] 图1为本发明采用PREP TC4粉末的激光熔化沉积增材制造及制件热处理方法的热处理工艺示意图。

## 具体实施方式

[0038] 为了让本发明的上述目的、特征和优点能更明显易懂,以下结合附图对本发明的具体实施方式作详细说明。

[0039] 现在将详细参考附图描述本发明的实施例。现在将详细参考本发明的优选实施例,其示例在附图中示出。在任何可能的情况下,在所有附图中将使用相同的标记来表示相同或相似的部分。

[0040] 此外,尽管本发明中所使用的术语是从公知公用的术语中选择的,但是本发明说明书中所提及的一些术语可能是申请人按他或她的判断来选择的,其详细含义在本文的描述的相关部分中说明。

[0041] 此外,要求不仅仅通过所使用的实际术语,而是还要通过每个术语所蕴含的意义来理解本发明。

[0042] 图1为本发明采用PREP TC4粉末的激光熔化沉积增材制造及制件热处理方法的热处理工艺示意图。

[0043] 如图1所示,本发明还公开了一种采用PREP TC4粉末的激光熔化沉积增材制造及制件热处理方法,其包括以下步骤:

[0044] 步骤S<sub>1</sub>、选用超高转速等离子旋转电极雾化法制备的TC4合金球形粉末,所述TC4合金球形粉末的粉末粒度为45 $\mu$ m-180 $\mu$ m。

[0045] 所述TC4合金球形粉末中粉末粒度小于等于45 $\mu$ m的粉末比例小于等于5%,粉末粒度45 $\mu$ m-180 $\mu$ m的粉末比例大于等于90%,粉末粒度大于等于180 $\mu$ m的粉末比例小于等于5%。粉末累积粒度分布D10 $\leq$ 68 $\mu$ m,D50 $\leq$ 116 $\mu$ m,D90 $\leq$ 180 $\mu$ m,所述TC4合金球形粉末的流动性小于等于26s/50g。

[0046] 此处D10、D50、D90代表的是粉末粒度特性。粒度分布用特定的仪器和方法反映出粉体样品中不同粒径颗粒占颗粒总量的百分数(数量、体积或质量)。通常分为区间分布和累计分布两种形式。区间分布又称为微分分布或频率分布,其表示一系列粒径区间中颗粒的百分含量。累计分布也叫积分分布,其表示小于或大于某粒径颗粒的百分含量。

[0047] 其中,累积粒度分布简称累积分布,即单位体积空气中大于或小于某规定粒径的颗粒粒子数目或体积、质量等于颗粒的总粒子数或总体积、总质量的百分比对其不同粒径的关系(注:通常为体积或质量)。

[0048] 本申请中,D10表示:粉末的累计粒度分布百分数达到10%时所对应的粒径。它的物理意义是粒径小于它的颗粒占10%,大于它的颗粒占90%。

[0049] 本申请中,D50表示:粉末的累计粒度分布百分数达到50%时所对应的粒径。它的物理意义是粒径大于它的颗粒占50%,小于它的颗粒也占50%,D50也叫中位径或中值粒径。D50常用来表示粉体的平均粒度。

[0050] 本申请中,D90表示:粉末的累计粒度分布百分数达到90%时所对应的粒径。它的物理意义是粒径小于它的颗粒占90%,大于它的颗粒占10%。

[0051] 步骤S<sub>2</sub>、利用同步送粉激光增材制造设备对所述TC4合金球形粉末进行LMD(激光熔化沉积)成形。

[0052] 其中,所述同步送粉激光增材制造设备的激光功率为1000-3200W,扫描速率优选为800-1500mm/s,送粉速率优选为4-28g/min,光斑直径优选为2-6mm,层厚优选为0.9-2mm,搭接率优选为30%-50%。

[0053] 步骤S<sub>3</sub>、将成形件置于真空热处理炉中进行固溶时效处理。

[0054] 具体地说,所述步骤S3包括以下内:炉内抽真空至5 $\times$ 10<sup>-3</sup>Pa,随炉升温至900 $^{\circ}$ C-

945℃(升温时间不短于2h),保温时间0.5h-2h,通入高纯氩气快速冷却至100℃,冷却时间小于等于20min,再空冷至室温。再随炉升温至500℃-580℃(温时间不短于1.5h),保温时间4h-8h,通入高纯氩气冷却至100℃,冷却时间小于等于30min,再空冷至室温。

[0055] 本发明中采用的真空热处理炉,经真空固溶时效处理及惰性气体冷却的热处理工艺后,能有效避免制件因冷速过快而在热处理过程中发生翘曲变形,产生魏氏组织,影响合金性能,且有效避免制件表面氧化、吸氢等问题。

[0056] 步骤S<sub>4</sub>、获得制件。

[0057] 实施例一:

[0058] 本实施例中,所述采用PREP TC4粉末的激光熔化沉积增材制造及制件热处理方法包括以下步骤:

[0059] 首先,采用超高转速等离子旋转电极雾化法制备的45μm-180μm TC4合金球形粉末。其中,所述TC4合金球形粉末中粉末粒度小于等于45μm的粉末比例占3.1%,粉末粒度45μm-180μm的粉末比例占93.2%,粉末粒度大于等于180μm的粉末比例占3.7%。粉末累积粒度分布D<sub>10</sub>=66.1μm,D<sub>50</sub>=110.4μm,D<sub>90</sub>=169.6μm。粉末流动性24.8s/50g。

[0060] 其次,LMD成形:利用同步送粉激光增材制造设备进行TC4合金成形,包括使用经切片处理后的模型数据。成形主要参数包括:激光功率1800W,扫描速率1000mm/s,送粉速率12g/min,光斑直径3mm,层厚1mm,搭接率50%。

[0061] 接着,热处理:将成形件置于真空热处理炉中进行固溶时效处理,炉内抽真空至 $5 \times 10^{-3}$ Pa,随炉升温至930℃(升温时间不短于2h),保温时间1h,通入高纯氩气快速冷却至100℃,冷却时间不超过20min,再空冷至室温。再随炉升温至540℃(温时间不短于1.5h),保温时间6h,通入高纯氩气冷却至100℃,冷却时间不超过30min,再空冷至室温。

[0062] 最后,获得制件。

[0063] 经上述工艺后,TC4钛合金制件致密度达99.6%,室温拉伸性能达锻件标准,室温断裂韧性 $K_{IC}=81.5\text{MN}/\text{m}^{1.5}$ ,100℃高温断裂韧性 $K_{IC}=93.9\text{MN}/\text{m}^{1.5}$ ,超锻件标准。

[0064] 实施例二:

[0065] 本实施例中,所述采用PREP TC4粉末的激光熔化沉积增材制造及制件热处理方法包括以下步骤:

[0066] 首先,采用超高转速等离子旋转电极雾化法制备的45μm-180μm TC4合金球形粉末。其中,所述TC4合金球形粉末中粉末粒度小于等于45μm的粉末比例占2.64%,粉末粒度45μm-180μm的粉末比例占94.6%,粉末粒度大于等于180μm的粉末比例占0.96%。粉末累积粒度分布D<sub>10</sub>=62.3μm,D<sub>50</sub>=106.9μm,D<sub>90</sub>=171.0μm。粉末流动性25.2s/50g。

[0067] 其次,LMD成形:利用同步送粉激光增材制造设备进行TC4合金成形,包括使用经切片处理后的模型数据,成形主要参数包括:激光功率3200W,扫描速率1500mm/s,送粉速率22g/min,光斑直径6mm,层厚1.6mm,搭接率30%。

[0068] 接着,热处理:将成形件置于真空热处理炉中进行固溶时效处理,炉内抽真空至 $5 \times 10^{-3}$ Pa,随炉升温至900℃(升温时间不短于2h),保温时间2h,通入高纯氩气快速冷却至100℃,冷却时间不超过20min,再空冷至室温。再随炉升温至500℃(温时间不短于1.5h),保温时间8h,通入高纯氩气冷却至100℃,冷却时间不超过30min,再空冷至室温。

[0069] 最后,获得制件。

[0070] 经上述工艺后,TC4钛合金制件致密度达99.7%,室温拉伸性能达锻件标准,室温断裂韧性 $K_{IC}=82\text{MN}/\text{m}^{1.5}$ ,100℃高温断裂韧性 $K_{IC}=94\text{MN}/\text{m}^{1.5}$ ,超锻件标准。

[0071] 实施例三;

[0072] 本实施例中,所述采用PREP TC4粉末的激光熔化沉积增材制造及制件热处理方法包括以下步骤:

[0073] 首先,采用超高转速等离子旋转电极雾化法制备的45 $\mu\text{m}$ -180 $\mu\text{m}$  TC4合金球形粉末。其中,所述TC4合金球形粉末中粉末粒度小于等于45 $\mu\text{m}$ 的粉末比例占3.57%,粉末粒度45 $\mu\text{m}$ -180 $\mu\text{m}$ 的粉末比例占92.4%,粉末粒度大于等于180 $\mu\text{m}$ 的粉末比例占4.03%。粉末累积粒度分布 $D_{10}=56.8\mu\text{m}$ , $D_{50}=104.8\mu\text{m}$ , $D_{90}=162.7\mu\text{m}$ 。粉末流动性25.8s/50g。

[0074] 其次,LMD成形:利用同步送粉激光增材制造设备进行TC4合金成形,包括使用经切片处理后的模型数据,成形主要参数包括:激光功率1000W,扫描速率800mm/s,送粉速率4g/min,光斑直径2mm,层厚0.9mm,搭接率50%。

[0075] 接着,热处理:将成形件置于真空热处理炉中进行固溶时效处理,炉内抽真空至 $5\times 10^{-3}\text{Pa}$ ,随炉升温至945℃(升温时间不短于2h),保温时间0.5h,通入高纯氩气快速冷却至100℃,冷却时间不超过20min,再空冷至室温。再随炉升温至580℃(温时间不短于1.5h),保温时间4h,通入高纯氩气冷却至100℃,冷却时间不超过30min,再空冷至室温。

[0076] 最后,获得制件。

[0077] 经上述工艺后,TC4钛合金制件致密度达99.6%,室温拉伸性能达锻件标准,室温断裂韧性 $K_{IC}=81.9\text{MN}/\text{m}^{1.5}$ ,100℃高温断裂韧性 $K_{IC}=93.7\text{MN}/\text{m}^{1.5}$ ,超锻件标准。

[0078] 根据上述描述,本发明能解决同步送粉的激光增材制造成形件内部产生的热应力、组织应力和凝固收缩应力,调控成形件组织和性能,同时满足航空航天高端装备制造领域对TC4合金构件成形质量、强度和塑性提出的更高要求,从原材料粉末性能上解决增材制造零件的成形质量问题。本发明采用等离子旋转电极雾化法所制备的TC4合金粉末进行同步送粉的激光熔化沉积增材制造,经真空固溶时效热处理后,其致密度达99.5%以上,室温拉伸性能达锻件标准,室温断裂韧性 $K_{IC}$ 不低于81 $\text{MN}/\text{m}^{1.5}$ ,100℃高温断裂韧性 $K_{IC}$ 不低于93 $\text{MN}/\text{m}^{1.5}$ ,超锻件标准,适用于航空航天等高端装备制造领域钛合金构件的成形和结构设计一体化制造。

[0079] 考虑到TC4合金成本高、难机加的特点,为提高TC4合金尤其是大型复杂构件的成形效率,采用同步送粉的激光增材制造近净成型的方法制备TC4钛合金构件,同时为避免在热处理过程中发生翘曲变形,产生魏氏组织,形成多余的表面氧化皮和因吸氢导致氢脆等现象,解决同步送粉的激光增材制造成形件内部产生的热应力、组织应力和凝固收缩应力,调控成形件组织和性能,满足航空航天高端装备制造领域对TC4合金构件成形质量、强度和塑性提出的更高要求,从原材料粉末性能上解决增材制造零件的成形质量和成形效率问题,从成形工艺上解决TC4合金成形效率和近净成形问题,从热处理工艺上解决TC4合金内部应力及表面氧化、吸氢问题。

[0080] 本发明采用等离子旋转电极雾化法所制备的TC4合金粉末,进行同步送粉的激光熔化沉积增材制造及真空固溶时效处理,及惰性气体冷却的热处理工艺处理后,能大大减少机加余量,有效提高材料利用率,增加成形效率,降低制造成本。同时还可以防止制件表面氧化及吸氢等现象,能有效避免制件因冷速过快而在热处理过程中发生翘曲变形,产生

魏氏组织,影响合金性能。最终获得TC4钛合金制件致密度达99.5%以上,室温拉伸性能达锻件标准,室温断裂韧性 $K_{IC}$ 不低于 $81\text{MN}/\text{m}^{1.5}$ , $100^\circ\text{C}$ 高温断裂韧性 $K_{IC}$ 不低于 $93\text{MN}/\text{m}^{1.5}$ ,超锻件标准,适用于航空航天等高端装备制造领域钛合金构件的成形和结构设计一体化制造。

[0081] 综上所述,本发明采用PREP TC4粉末的激光熔化沉积增材制造及制件热处理方法具有如下优点:

[0082] 一、本发明将成形件置于真空热处理炉中进行固溶时效处理,避免了制件因普通热处理炉中的氧、水蒸气、氢的影响而导致的表面氧化和氢脆现象,同时采用高纯氩气冷却的方式避免了固溶处理时采用水冷的方式引起的冷却速度过大,而使制件发生翘曲变形,及变形引起的局部温度过高导致形成魏氏组织,降低制件的性能。

[0083] 二、本发明采用的PREP TC4 (Ti6Al4V) 合金球形无空心粉,粉末流动性好,卫星粉含量少,粉末粒度范围窄,能有效避免因空心粉造成的气孔、孔隙等缺陷,以及因粉末流动性差造成的送粉不均给成形过程带来问题。同时还避免了因送粉不均导致的融合不良或未融合缺陷,从粉末原材料性能方面提高成形质量和成形效率,拓宽PREP TC4 (Ti6Al4V) 粉末的应用范围。

[0084] 三、本发明采用PREP TC4 (Ti6Al4V) 合金粉末进行同步送粉的激光增材制造,通过采用上述技术方案的成形工艺及成形件热处理工艺方法,不仅能有效提高TC4合金的成形效率,同时使TC4钛合金制件致密度达99.5%以上,室温拉伸性能达锻件标准,室温断裂韧性 $K_{IC}$ 不低于 $81\text{MN}/\text{m}^{1.5}$ , $100^\circ\text{C}$ 高温断裂韧性 $K_{IC}$ 不低于 $93\text{MN}/\text{m}^{1.5}$ ,超锻件标准,拓宽了使用PREP Ti6Al4V合金粉末进行同步送粉的激光增材制造所得制件的成形及热处理调控方法,扩大了应用范围。

[0085] 虽然以上描述了本发明的具体实施方式,但是本领域的技术人员应当理解,这些仅是举例说明,本发明的保护范围是由所附权利要求书限定的。本领域的技术人员在不背离本发明的原理和实质的前提下,可以对这些实施方式作出多种变更或修改,但这些变更和修改均落入本发明的保护范围。

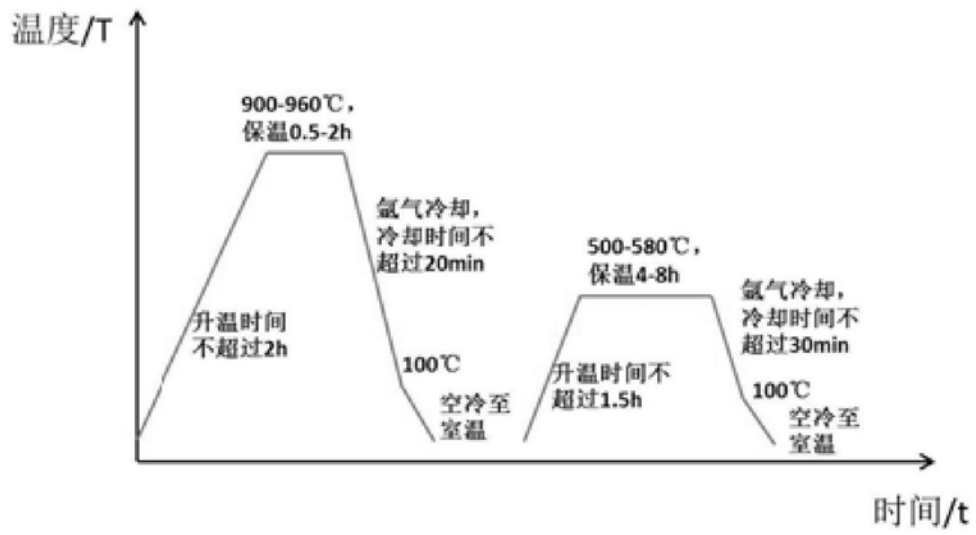


图1