



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114367663 B

(45) 授权公告日 2023. 01. 10

(21) 申请号 202111567335.8	B22F 1/10 (2022.01)
(22) 申请日 2021.12.20	B22F 3/10 (2006.01)
(65) 同一申请的已公布的文献号	B22F 3/26 (2006.01)
申请公布号 CN 114367663 A	B22F 5/00 (2006.01)
(43) 申请公布日 2022.04.19	B29C 64/129 (2017.01)
(73) 专利权人 北京科技大学	B33Y 10/00 (2015.01)
地址 100083 北京市海淀区学院路30号	审查员 董明
专利权人 北京科技大学顺德研究生院	
(72) 发明人 杨芳 李泽北 郭志猛 陈存广	
隋延力 杨松 李延丽 郭丽丽	
(74) 专利代理机构 北京市广友专利事务有限	
责任公司 11237	
专利代理师 张仲波	
(51) Int. Cl.	
B22F 3/22 (2006.01)	权利要求书1页 说明书9页

(54) 发明名称

一种全致密复杂形状钛合金薄壁零部件的制备方法

(57) 摘要

本发明公开一种全致密复杂形状钛合金薄壁零部件的制备方法,属于精密异形钛合金零件制备的技术领域。所述方法包括复杂形状的塑料零件制备、凝胶注模成形的复杂模具制备、悬浮浆料的制备、凝胶注模、热脱脂+真空烧结、刷覆+热处理。其是通过将低熔点金属粉末刷覆在复杂形状零件的表面,利用真空负压热处理方式使得低熔点金属溶渗进入多孔钛合金零件的孔隙中,并在热处理过程中合金元素扩散至钛基体内部,使钛合金薄壁零件全致密且组织成分均匀,最终获得尺寸精确控制的全致密钛合金复杂薄壁零件。本发明的制备方法能够保证零件精密尺寸的精确控制,所制备的复杂形状钛合金薄壁零部件全致密且组织均匀,工艺简单,流程短,适用性强,低成本。

1. 一种全致密复杂形状钛合金薄壁零部件的制备方法,其特征在于,所述制备方法包括如下步骤:

S1、复杂形状的塑料零件制备:按照目标零件的复杂形状获得零部件的主体设计图,并根据产品烧结收缩比将零部件的主体按比例放大,再通过光固化3D打印制备出复杂形状的塑料零件;

S2、凝胶注模成形用的复杂模具制备:将所述步骤S1中的塑料零件通过硅胶或聚氨酯进行倒模,并将模具设计成左右分模方式,获得凝胶注模成形用的复杂模具;

S3、悬浮浆料的制备:将钛粉末或钛合金粉末、凝胶体系、油酸、消泡剂混合并搅拌,搅拌均匀后得到悬浮浆料;

S4、凝胶注模:向所述步骤S3中的悬浮浆料中加入催化剂,搅拌均匀后,将悬浮浆料中倒入所述步骤S2中的复杂模具中,倒入过程中打开振动台,随后在室温下固化,拆模后获得复杂形状的薄壁坯体;

S5、热脱脂+真空烧结:将所述步骤S4中的薄壁坯体放入脱脂烧结炉中进行脱脂烧结,之后进行真空烧结,冷却后获得多孔复杂形状薄壁零部件;

S6、刷覆+热处理:对所述步骤S5中的多孔复杂形状薄壁零部件表面刷覆低熔点金属粉末料浆,之后进行真空热处理,冷却后获得全致密的复杂形状钛合金薄壁零部件;

所述步骤S1中的放大比例为1.04-1.18,塑料零件的表面粗糙度 $\leq 1.0\mu\text{m}$;

所述步骤S4中的催化剂与所述步骤S3中的凝胶体系所对应,根据凝胶体系不同而不同;

所述步骤S5中的多孔复杂形状薄壁零部件的孔隙度为20-60%;

所述步骤S6 中的低熔点金属粉末为铝粉、锡粉、铝钒合金粉、铝硅合金粉、铜锡合金粉或铜铝合金粉中的至少一种;

所述步骤S6中的低熔点金属粉末与酒精或丙酮溶剂配成低熔点金属粉末料浆,粉末体积百分比为70-90vol.%;热处理温度为300-1000℃,保温3-6h,真空度为 $<10\text{Pa}$ 。

2. 根据权利要求1所述的全致密复杂形状钛合金薄壁零部件的制备方法,其特征在于,所述步骤S3中的凝胶体系为水基或非水基凝胶体系。

3. 根据权利要求1所述的全致密复杂形状钛合金薄壁零部件的制备方法,其特征在于,所述步骤S3中的悬浮浆料中钛粉末占40-65vol.%,油酸占0.05-0.5vol.%,消泡剂占0.05-0.2vol.%,余量为凝胶体系。

4. 根据权利要求1所述的全致密复杂形状钛合金薄壁零部件的制备方法,其特征在于,所述步骤S4中的复杂形状的薄壁坯体的厚度为3-20mm。

5. 根据权利要求1所述的全致密复杂形状钛合金薄壁零部件的制备方法,其特征在于,所述步骤S5中的热脱脂温度为300-800℃,保温3-12h;烧结温度为1000-1200℃,保温1-3h,真空度为 10^{-3} - 10^{-1}Pa 。

一种全致密复杂形状钛合金薄壁零部件的制备方法

技术领域

[0001] 本发明属于精密异形钛合金零件制备的技术领域,涉及一种全致密复杂形状钛合金薄壁零部件的制备方法。

背景技术

[0002] 钛及其合金因为具有密度低、强度高、耐蚀性好等优良性能,已经成为航空航天以及海洋深潜等前沿领域的重要结构材料。

[0003] 然而,钛合金难加工,对于大尺寸复杂形状的钛合金精密零部件来说,目前主要通过机加工、热等静压、3D打印等方式成形,其中热等静压技术制备的精密尺寸复杂零件,需采用钢制外包套,内制石墨模芯,只能精确控制内尺寸,无法控制外尺寸,对于精密尺寸零件的制备较为困难。

[0004] 激光或电子束3D打印的方式,对粉末要求较高,打印用粉末须满足球形度高、流动性好、松装密度高、粒径细小和粒度分布较窄等要求。而且打印设备基础成本较高,加工周期长无法满足大批量生产。

[0005] 传统机加工方式材料损耗率较高,加工周期长,加工步骤复杂,成本较高,同样无法满足快速大批量生产的要求。

[0006] 凝胶注模成形是一种低成本近净成形技术,将金属粉末与凝胶体系均匀混合,得到悬浮浆料后,将浆料注入到闭合模具的模腔中,原位固化,获得复杂形状坯体,经脱脂烧结后,获得目标零部件。能加工复杂形状,带内部复杂结构的制品,适合制备大尺寸、复杂形状、薄壁的各类异形件,生产效率高。

[0007] 相较于传统复杂成形工艺,凝胶注模成形技术优势明显,合金成分均匀,原材料利用率高,步骤简单,成本较低,大批量复杂形状零部件的生产能力强,大大推动复杂形状零部件的工业化生产和应用。

[0008] 例如:中国专利CN 105543526 A公开了一种利用凝胶注模成形制备高致密度钛或钛合金的方法,其中并未对复杂形状薄壁零部件进行模具制备,致密度是通过脱脂烧结后的热等静压处理得到,而热等静压并不适合复杂形状薄壁零部件的形状制备,而且固化过程中未振动,产品成分并不均匀。

[0009] 中国专利CN 103801696 A公开了一种利用3D打印模具制备粉末冶金复杂形状零件的方法,所制备的零件为复杂形状薄壁中空的零件,并未考虑产品烧结收缩比将零部件的主体按比例放大,后续的固化过程也未振动,且脱脂烧结并未对致密度进行提高,故而致密度不能达到全致密。

[0010] 中国专利CN 113458399 A公开了一种短流程制备大尺寸钛合金螺旋桨的方法,为了实现大尺寸钛合金螺旋桨的凝胶注模成形并保证坯体质量和烧结性能,采用上下开模方式结合振动台振动,保证坯体成形质量,同时为了减少坯体孔隙,通过冷等静压成形实现坯体的进一步致密化;故而其中的致密度提高是通过将固化后的坯体进行冷等静压成形来实现,由于未脱脂就进行冷等静压,故而脱脂烧结后的大尺寸钛合金螺旋桨形状并不复杂,致

密度也不能达到全致密。

[0011] 综上,凝胶注模成形所制备得到的钛合金零部件往往存在一定的孔隙,制备的零件很难做到完全致密;尤其对于复杂形状的薄壁零部件来说,凝胶注模坯体的粉末固含量一般都是不超过70vol.%,致密化烧结过程中存在大幅度的烧结收缩技术缺陷;而烧结收缩越大,收缩变形就越严重,从而使得薄壁零部件的精确尺寸越难以保证,尺寸精确控制越难。

[0012] 虽然存在通过热等静压和冷等静压等提高凝胶注模成形产品致密度的方法,但是并不适合复杂形状的钛合金薄壁零部件,特别是对薄壁零部件尺寸的精确控制更是难以实现。

发明内容

[0013] 本发明解决的技术问题是现有技术中的金属注射成型复杂形状零部件难以全致密,热等静压和冷等静压虽然能够在一定程度上提高致密度,但是在复杂形状零部件的尺寸控制上并不精准,不适合复杂形状钛合金薄壁零部件的工业大规模精确生产。

[0014] 为解决上述技术问题,本发明提供如下技术方案:

[0015] 一种全致密复杂形状钛合金薄壁零部件的制备方法,所述制备方法包括如下步骤:

[0016] S1、复杂形状的塑料零件制备:按照目标零件的复杂形状获得零部件的主体设计图,并根据产品烧结收缩比将零部件的主体按比例放大,再通过光固化3D打印制备出复杂形状的塑料零件;

[0017] S2、凝胶注模成形用的复杂模具制备:将所述步骤S1中的塑料零件通过硅胶或聚氨酯进行倒模,并将模具设计成左右分模方式,获得凝胶注模成形用的复杂模具;

[0018] S3、悬浮浆料的制备:将钛粉末或钛合金粉末、凝胶体系、油酸、消泡剂混合并搅拌,搅拌均匀后得到悬浮浆料;

[0019] S4、凝胶注模:向所述步骤S3中的悬浮浆料中加入催化剂,搅拌均匀后,将悬浮浆料中倒入所述步骤S2中的复杂模具中,倒入过程中打开振动台,随后在室温下固化,拆模后获得复杂形状的薄壁坯体;

[0020] S5、热脱脂+真空烧结:将所述步骤S4中的薄壁坯体放入脱脂烧结炉中进行脱脂烧结,之后进行真空烧结,冷却后获得多孔复杂形状薄壁零部件;

[0021] S6、刷覆+热处理:对所述步骤S5中的多孔复杂形状薄壁零部件表面刷覆低熔点金属粉末料浆,之后进行真空热处理,冷却后获得全致密的复杂形状钛合金薄壁零部件。

[0022] 优选地,所述步骤S1中的放大比例为1.04-1.18,塑料零件的表面粗糙度 $\leq 1.0\mu\text{m}$ 。

[0023] 优选地,所述步骤S3中的钛粉末或钛合金粉末为各种市售牌号的纯钛或钛合金粉末,粉末粒径 $\leq 100\mu\text{m}$ 。

[0024] 优选地,所述步骤S3中的凝胶体系为水基或非水基凝胶体系。

[0025] 优选地,所述步骤S3中的悬浮浆料中钛粉末占40-65vol.%,油酸占0.05-0.5vol.%,消泡剂占0.05-0.2vol.%,余量为凝胶体系。

[0026] 优选地,所述步骤S4中的催化剂与所述步骤S3中的凝胶体系所对应,根据凝胶体系不同而不同。

[0027] 优选地,所述步骤S4中的复杂形状的薄壁坯体的厚度为3-20mm。

[0028] 优选地,所述步骤S5中的多孔复杂形状薄壁零部件的孔隙度为20-60%。

[0029] 优选地,所述步骤S5中的热脱脂温度为300-800℃,保温3-12h;烧结温度为1000-1200℃,保温1-3h,真空度为 10^{-3} - 10^{-1} Pa。

[0030] 优选地,所述步骤S5中的脱脂烧结工艺为400-470℃下保温3-5h,600-680℃下保温4-6h。

[0031] 优选地,所述步骤S5中的脱脂烧结工艺为300-350℃下,保温2h,500-540℃下保温4h,700℃下保温2h。

[0032] 优选地,所述步骤S6中的低熔点金属粉末与酒精或丙酮溶剂配成低熔点金属粉末料浆,粉末体积百分比为70-90vol.%;热处理温度为300-1000℃,保温3-6h,真空度为<10Pa。

[0033] 优选地,所述步骤S6中的低熔点金属粉末为铝粉、锡粉、铝钒合金粉、铝硅合金粉、铜锡合金粉或铜铝合金粉中的至少一种。

[0034] 优选地,所述步骤S6中的低熔点金属粉末还适用于各种熔点低于1000℃的其他合金粉末。

[0035] 优选地,所述步骤S6中的刷覆粉末浆料的厚度由所述步骤S5中的多孔复杂形状薄壁零部件的孔隙度和所述步骤S6中的低熔点金属粉末的密度共同决定。

[0036] 优选地,全致密复杂形状钛合金薄壁零部件的生产成本相对现有技术降低70%以上,全致密复杂形状钛合金薄壁零部件无残留孔隙或相对密度不低于99%。

[0037] 本发明实施例提供的上述技术方案,至少具有如下有益效果:

[0038] 上述方案中,本发明提出了一种全致密复杂形状钛合金薄壁零部件的制备方法,解决了复杂形状凝胶注模成形钛合金孔隙率高、致密度低、精密尺寸难以精确控制等问题。

[0039] 本发明通过光固化3D打印的方式获得具有复杂形状的等比例高精度放大模型,再进行倒模以获得凝胶注模成形用的模具,利用高精度模型倒模保证了凝胶注模成形坯体具有高的表面质量。

[0040] 本发明中的钛粉末或钛合金粉末的原料粉末范围广,可以适用于100μm内各种牌号的钛及钛合金粉末,对粉末形状无要求,可降低原料成本,有利于实现低成本生产。

[0041] 本发明通过凝胶注模成形获得复杂形状的钛合金薄壁坯体,通过脱脂烧结,脱除坯体中的有机物,且不完全烧结致密化,孔隙度控制在20-60%,可以保证零件具有一定的强度,同时通过控制低的烧结收缩率,零件收缩变形几乎没有,保证零件精密尺寸的精确控制,改善了传统凝胶注模方式烧结后尺寸精度不高、烧结收缩变形严重等问题。

[0042] 本发明为了控制其烧结收缩变形,进行不完全烧结,在300-800℃下脱除有机物,并在1000-1200℃下烧结,使坯体具有一定强度但仍存在残余孔隙,这种情况下坯体的烧结收缩系数低,不存在收缩变形,尺寸精度高。

[0043] 本发明通过将低熔点金属粉末刷覆在复杂形状零件的表面,利用真空负压热处理方式使得低熔点金属溶渗进入多孔钛合金零件的孔隙中,并在热处理过程中合金元素扩散至钛基体内部,使钛合金薄壁零件全致密且组织成分均匀,最终获得尺寸精确控制的全致密钛合金复杂薄壁零件;不仅解决了传统凝胶注模孔隙率高,致密度低的问题;还能够同时根据产品需要,按照特定牌号的钛合金成分比例熔渗低熔点金属粉末,实现特定成分制备

致密精确的钛合金零件。

[0044] 本发明制备过程中,钛粉末的装载量40-65vol.%、真空烧结温度1000-1200℃、放大比例1.04-1.18及孔隙度20-60%四者之间通过匹配协同制备全致密复杂形状钛合金薄壁零部件。

[0045] 此外,本发明的制备方法不仅仅局限于各种钛及钛合金,还适用于其它各种其他金属薄壁零部件的复杂致密成形,如钢、硬质合金、铜等。

[0046] 总之,本发明制备工艺简单,流程短,适用性强,脱脂效果好,低成本,解决了传统复杂形状钛合金制备成本高,工艺复杂,周期长等问题;且其烧结收缩系数在制备模具时就已考虑,致密度通过刷覆低熔点金属粉末并熔渗来调节,所制备的复杂形状钛合金薄壁零部件全致密且组织均匀,适合全致密复杂形状钛合金薄壁零部件的工业大规模生产和推广。

具体实施方式

[0047] 为使本发明要解决的技术问题、技术方案和优点更加清楚,下面将结合具体实施例进行详细描述。

[0048] 实施例1

[0049] 一种全致密复杂形状钛合金薄壁零部件的制备方法,所述制备方法包括如下步骤:

[0050] S1、复杂形状的塑料零件制备:按照目标零件的复杂形状获得零部件的主体设计图,并根据产品烧结收缩比将零部件的主体按比例放大,再通过光固化3D打印制备出复杂形状的塑料零件,放大比例为1.18,塑料零件的表面粗糙度 $0.6\mu\text{m}$;

[0051] S2、凝胶注模成形用的复杂模具制备:将所述步骤S1中的塑料零件通过硅胶或聚氨酯进行倒模,并将模具设计成左右分模方式,获得凝胶注模成形用的复杂模具;

[0052] S3、悬浮浆料的制备:将钛合金粉末、凝胶体系、油酸、消泡剂混合并搅拌,悬浮浆料中钛合金粉末占45vol.%,油酸占0.08vol.%,消泡剂占0.08vol.%,余量为非水凝胶体系,钛合金粉末为各种市售牌号的钛合金粉末,粉末粒径为 $45\mu\text{m}$,搅拌均匀后得到悬浮浆料;

[0053] S4、凝胶注模:向所述步骤S3中的悬浮浆料中加入0.03wt.%催化剂,搅拌均匀后,将悬浮浆料中倒入所述步骤S2中的复杂模具中,倒入过程中打开振动台,振动15min,随后在室温下固化2h,拆模后获得复杂形状的薄壁坯体,复杂形状的薄壁坯体的厚度为8mm;

[0054] S5、热脱脂+真空烧结:将所述步骤S4中的薄壁坯体放入脱脂烧结炉中进行脱脂烧结,脱脂烧结工艺为400℃下保温3h,600℃下保温4h;之后进行真空烧结,烧结温度为1100℃,保温3h,真空度为 10^{-2}Pa ,冷却后获得多孔复杂形状薄壁零部件,多孔复杂形状薄壁零部件的孔隙度为~50%;

[0055] S6、刷覆+热处理:对所述步骤S5中的多孔复杂形状薄壁零部件表面刷覆低熔点金属粉末料浆,低熔点金属粉末为70wt.%铝粉(密度 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$)与30wt.%铝钒合金粉(密度 $3.47\text{g}/\text{cm}^3$)的混合粉;其中低熔点金属粉末与酒精或丙酮溶剂配成低熔点金属粉末料浆,粉末体积百分比为85vol.%;之后进行真空热处理,热处理温度为940℃,保温4h,真空度为2Pa,冷却后获得全致密的复杂形状钛合金薄壁零部件,无残留孔隙,全致密复杂形状钛合

金薄壁零部件的生产成本相对现有技术降低72；

[0056] 其中,所述复杂形状为锯齿状。

[0057] 实施例2

[0058] 一种全致密复杂形状钛合金薄壁零部件的制备方法,所述制备方法包括如下步骤:

[0059] S1、复杂形状的塑料零件制备:按照目标零件的复杂形状获得零部件的主体设计图,并根据产品烧结收缩比将零部件的主体按比例放大,再通过光固化3D打印制备出复杂形状的塑料零件,放大比例为1.10,塑料零件的表面粗糙度 $0.7\mu\text{m}$;

[0060] S2、凝胶注模成形用的复杂模具制备:将所述步骤S1中的塑料零件通过硅胶或聚氨酯进行倒模,并将模具设计成左右分模方式,获得凝胶注模成形用的复杂模具;

[0061] S3、悬浮浆料的制备:将钛粉末或钛合金粉末、凝胶体系、油酸、消泡剂混合并搅拌,悬浮浆料中钛粉末占62vol.%,油酸占0.2vol.%,消泡剂占0.15vol.%,余量为凝胶体系,钛粉末为各种市售牌号的纯钛粉末,粉末粒径为 $70\mu\text{m}$,搅拌均匀后得到悬浮浆料;

[0062] S4、凝胶注模:向所述步骤S3中的悬浮浆料中加入催化剂,搅拌均匀后,将悬浮浆料中倒入所述步骤S2中的复杂模具中,倒入过程中打开振动台振动20min,随后在室温下固化3h,拆模后获得复杂形状的薄壁坯体,复杂形状的薄壁坯体的厚度为11mm;

[0063] S5、热脱脂+真空烧结:将所述步骤S4中的薄壁坯体放入脱脂烧结炉中进行脱脂烧结,脱脂烧结工艺为 300°C 下,保温2h, 500°C 下保温4h, 700°C 下保温2h;之后进行真空烧结,烧结温度为 1180°C ,保温4h,真空度为 10^{-3}Pa ,冷却后获得多孔复杂形状薄壁零部件,多孔复杂形状薄壁零部件的孔隙度为 $\sim 28\%$;

[0064] S6、刷覆+热处理:对所述步骤S5中的多孔复杂形状薄壁零部件表面刷覆密度为 $7.28\text{g}/\text{cm}^3$ 的低熔点金属粉末料浆,低熔点金属粉末为锡粉;其中低熔点金属粉末与酒精或丙酮溶剂配成低熔点金属粉末料浆,粉末体积百分比为75vol.%;之后进行真空热处理,热处理温度为 390°C ,保温5h,真空度为1Pa,冷却后获得全致密的复杂形状钛合金薄壁零部件,无残留孔隙,全致密复杂形状钛合金薄壁零部件的生产成本相对现有技术降低74%。

[0065] 其中,所述复杂形状为U形状。

[0066] 实施例3

[0067] 一种全致密复杂形状钛合金薄壁零部件的制备方法,所述制备方法包括如下步骤:

[0068] S1、复杂形状的塑料零件制备:按照目标零件的复杂形状获得零部件的主体设计图,并根据产品烧结收缩比将零部件的主体按比例放大,再通过光固化3D打印制备出复杂形状的塑料零件,放大比例为1.04,塑料零件的表面粗糙度 $0.8\mu\text{m}$;

[0069] S2、凝胶注模成形用的复杂模具制备:将所述步骤S1中的塑料零件通过硅胶或聚氨酯进行倒模,并将模具设计成左右分模方式,获得凝胶注模成形用的复杂模具;

[0070] S3、悬浮浆料的制备:将钛粉末或钛合金粉末、凝胶体系、油酸、消泡剂混合并搅拌,悬浮浆料中钛粉末占50vol.%,油酸占0.1vol.%,消泡剂占0.12vol.%,余量为凝胶体系,钛粉末或钛合金粉末为各种市售牌号的纯钛或钛合金粉末,粉末粒径为 $60\mu\text{m}$,搅拌均匀后得到悬浮浆料;

[0071] S4、凝胶注模:向所述步骤S3中的悬浮浆料中加入催化剂,搅拌均匀后,将悬浮浆

料中倒入所述步骤S2中的复杂模具中,倒入过程中打开振动台,振动15min,随后在室温下固化2h,拆模后获得复杂形状的薄壁坯体,复杂形状的薄壁坯体的厚度为15mm;

[0072] S5、热脱脂+真空烧结:将所述步骤S4中的薄壁坯体放入脱脂烧结炉中进行脱脂烧结,脱脂烧结工艺为420℃下保温4h,650℃下保温5h;之后进行真空烧结,烧结温度为1000℃,保温3h,真空度为 10^{-3} Pa,冷却后获得多孔复杂形状薄壁零部件,多孔复杂形状薄壁零部件的孔隙度为~48%;

[0073] S6、刷覆+热处理:对所述步骤S5中的多孔复杂形状薄壁零部件表面刷覆密度为 $2.65\text{g}/\text{cm}^3$ 的低熔点金属粉末料浆,低熔点金属粉末为铝硅合金粉;其中低熔点金属粉末与酒精或丙酮溶剂配成低熔点金属粉末料浆,粉末体积百分比为87vol.%;之后进行真空热处理,热处理温度为850℃,保温6h,真空度为3Pa,冷却后获得全致密的复杂形状钛合金薄壁零部件,无残留孔隙,全致密复杂形状钛合金薄壁零部件的生产成本相对现有技术降低76%;

[0074] 其中,所述复杂形状为狗骨头状。

[0075] 实施例4

[0076] 一种全致密复杂形状钛合金薄壁零部件的制备方法,所述制备方法包括如下步骤:

[0077] S1、复杂形状的塑料零件制备:按照目标零件的复杂形状获得零部件的主体设计图,并根据产品烧结收缩比将零部件的主体按比例放大,再通过光固化3D打印制备出复杂形状的塑料零件,放大比例为1.06,塑料零件的表面粗糙度为 $0.9\mu\text{m}$;

[0078] S2、凝胶注模成形用的复杂模具制备:将所述步骤S1中的塑料零件通过硅胶或聚氨酯进行倒模,并将模具设计成左右分模方式,获得凝胶注模成形用的复杂模具;

[0079] S3、悬浮浆料的制备:将钛粉末或钛合金粉末、凝胶体系、油酸、消泡剂混合并搅拌,悬浮浆料中钛粉末占58vol.%,油酸占0.3vol.%,消泡剂占0.17vol.%,余量为凝胶体系,钛粉末或钛合金粉末为各种市售牌号的纯钛或钛合金粉末,粉末粒径为 $25\mu\text{m}$,搅拌均匀后得到悬浮浆料;

[0080] S4、凝胶注模:向所述步骤S3中的悬浮浆料中加入催化剂,搅拌均匀后,将悬浮浆料中倒入所述步骤S2中的复杂模具中,倒入过程中打开振动台,振动15min,随后在室温下固化2h,拆模后获得复杂形状的薄壁坯体,复杂形状的薄壁坯体的厚度为6mm;

[0081] S5、热脱脂+真空烧结:将所述步骤S4中的薄壁坯体放入脱脂烧结炉中进行脱脂烧结,脱脂烧结工艺为350℃下,保温2h,540℃下保温4h,720℃下保温2h;之后进行真空烧结,烧结温度为1200℃,保温1h,真空度为 10^{-1} Pa,冷却后获得多孔复杂形状薄壁零部件,多孔复杂形状薄壁零部件的孔隙度为~22%;

[0082] S6、刷覆+热处理:对所述步骤S5中的多孔复杂形状薄壁零部件表面刷覆低熔点金属粉末料浆,低熔点金属粉末为20wt.%铝钒合金粉(密度 $3.47\text{g}/\text{cm}^3$)和80wt.%铝硅合金粉(密度 $2.65\text{g}/\text{cm}^3$)的混合粉;其中低熔点金属粉末与酒精或丙酮溶剂配成低熔点金属粉末料浆,粉末体积百分比为72vol.%;之后进行真空热处理,热处理温度为960℃,保温5h,真空度为2Pa,冷却后获得全致密的复杂形状钛合金薄壁零部件,无残留孔隙,全致密复杂形状钛合金薄壁零部件的生产成本相对现有技术降低77%;

[0083] 其中,所述复杂形状为回形状。

[0084] 实施例5

[0085] 一种全致密复杂形状钛合金薄壁零部件的制备方法,所述制备方法包括如下步骤:

[0086] S1、复杂形状的塑料零件制备:按照目标零件的复杂形状获得零部件的主体设计图,并根据产品烧结收缩比将零部件的主体按比例放大,再通过光固化3D打印制备出复杂形状的塑料零件,放大比例为1.1.15,塑料零件的表面粗糙度为1.0 μm ;

[0087] S2、凝胶注模成形用的复杂模具制备:将所述步骤S1中的塑料零件通过硅胶或聚氨酯进行倒模,并将模具设计成左右分模方式,获得凝胶注模成形用的复杂模具;

[0088] S3、悬浮浆料的制备:将钛粉末或钛合金粉末、凝胶体系、油酸、消泡剂混合并搅拌,悬浮浆料中钛粉末占60vol.%,油酸占0.4vol.%,消泡剂占0.19vol.%,余量为凝胶体系,钛粉末或钛合金粉末为各种市售牌号的纯钛或钛合金粉末,粉末粒径为55 μm ,搅拌均匀后得到悬浮浆料;

[0089] S4、凝胶注模:向所述步骤S3中的悬浮浆料中加入催化剂,搅拌均匀后,将悬浮浆料中倒入所述步骤S2中的复杂模具中,倒入过程中打开振动台,振动15min,随后在室温下固化2h,拆模后获得复杂形状的薄壁坯体,复杂形状的薄壁坯体的厚度为17mm;

[0090] S5、热脱脂+真空烧结:将所述步骤S4中的薄壁坯体放入脱脂烧结炉中进行脱脂烧结,脱脂烧结工艺为470 $^{\circ}\text{C}$ 下保温5h,680 $^{\circ}\text{C}$ 下保温6h;之后进行真空烧结,烧结温度为1050 $^{\circ}\text{C}$,保温1-3h,真空度为 10^{-2}Pa ,冷却后获得多孔复杂形状薄壁零部件,多孔复杂形状薄壁零部件的孔隙度为 $\sim 34\%$;

[0091] S6、刷覆+热处理:对所述步骤S5中的多孔复杂形状薄壁零部件表面刷覆密度为8.05g/cm³的低熔点金属粉末料浆,低熔点金属粉末为铜锡合金粉;其中低熔点金属粉末与酒精或丙酮溶剂配成低熔点金属粉末料浆,粉末体积百分比为90vol.%;之后进行真空热处理,热处理温度为976 $^{\circ}\text{C}$,保温5.5h,真空度为3Pa,冷却后获得全致密的复杂形状钛合金薄壁零部件,相对密度99.8%,全致密复杂形状钛合金薄壁零部件的生产成本相对现有技术降低75%;

[0092] 其中,所述复杂形状为阶梯状。

[0093] 实施例6

[0094] 一种全致密复杂形状钛合金薄壁零部件的制备方法,所述制备方法包括如下步骤:

[0095] S1、复杂形状的塑料零件制备:按照目标零件的复杂形状获得零部件的主体设计图,并根据产品烧结收缩比将零部件的主体按比例放大,再通过光固化3D打印制备出复杂形状的塑料零件,放大比例为1.16,塑料零件的表面粗糙度为0.9 μm ;

[0096] S2、凝胶注模成形用的复杂模具制备:将所述步骤S1中的塑料零件通过硅胶或聚氨酯进行倒模,并将模具设计成左右分模方式,获得凝胶注模成形用的复杂模具;

[0097] S3、悬浮浆料的制备:将钛粉末或钛合金粉末、凝胶体系、油酸、消泡剂混合并搅拌,悬浮浆料中钛粉末占65vol.%,油酸占0.5vol.%,消泡剂占0.2vol.%,余量为凝胶体系,钛粉末或钛合金粉末为各种市售牌号的纯钛或钛合金粉末,粉末粒径为38 μm ,搅拌均匀后得到悬浮浆料;

[0098] S4、凝胶注模:向所述步骤S3中的悬浮浆料中加入催化剂,搅拌均匀后,将悬浮浆

料中倒入所述步骤S2中的复杂模具中,倒入过程中打开振动台,振动15min,随后在室温下固化2h,拆模后获得复杂形状的薄壁坯体,复杂形状的薄壁坯体的厚度为12mm;

[0099] S5、热脱脂+真空烧结:将所述步骤S4中的薄壁坯体放入脱脂烧结炉中进行脱脂烧结,脱脂烧结工艺为320℃下,保温3h,510℃下保温3h,740℃下保温4h;之后进行真空烧结,烧结温度为1180℃,保温2.8h,真空度为 10^{-1} Pa,冷却后获得多孔复杂形状薄壁零部件,多孔复杂形状薄壁零部件的孔隙度为~23%;

[0100] S6、刷覆+热处理:对所述步骤S5中的多孔复杂形状薄壁零部件表面刷覆密度为 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ 的低熔点金属粉末料浆,低熔点金属粉末为铝粉;其中低熔点金属粉末与酒精或丙酮溶剂配成低熔点金属粉末料浆,粉末体积百分比为70vol.%;之后进行真空热处理,热处理温度为729℃,保温4h,真空度为1Pa,冷却后获得全致密的复杂形状钛合金薄壁零部件,无残留孔隙,全致密复杂形状钛合金薄壁零部件的生产成本相对现有技术降低76.2%;

[0101] 其中,所述复杂形状为上凹下凸状。

[0102] 上述方案中,本发明提出了一种全致密复杂形状钛合金薄壁零部件的制备方法,解决了复杂形状凝胶注模成形钛合金孔隙率高、致密度低、精密尺寸难以精确控制等问题。

[0103] 本发明通过光固化3D打印的方式获得具有复杂形状的等比例高精度放大模型,再进行倒模以获得凝胶注模成形用的模具,利用高精度模型倒模保证了凝胶注模成形坯体具有高的表面质量。

[0104] 本发明中的钛粉末或钛合金粉末的原料粉末范围广,可以适用于 $100\mu\text{m}$ 内各种牌号的钛及钛合金粉末,对粉末形状无要求,可降低原料成本,有利于实现低成本生产。

[0105] 本发明通过凝胶注模成形获得复杂形状的钛合金薄壁坯体,通过脱脂烧结,脱除坯体中的有机物,且不完全烧结致密化,孔隙度控制在20-60%,可以保证零件具有一定的强度,同时通过控制低的烧结收缩率,零件收缩变形几乎没有,保证零件精密尺寸的精确控制,改善了传统凝胶注模方式烧结后尺寸精度不高、烧结收缩变形严重等问题。

[0106] 本发明为了控制其烧结收缩变形,进行不完全烧结,在300-800℃下脱除有机物,并在1000-1200℃下烧结,使坯体具有一定强度但仍存在残余孔隙,这种情况下坯体的烧结收缩系数低,不存在收缩变形,尺寸精度高。

[0107] 本发明通过将低熔点金属粉末刷覆在复杂形状零件的表面,利用真空负压热处理方式使得低熔点金属溶渗进入多孔钛合金零件的孔隙中,并在热处理过程中合金元素扩散至钛基体内部,使钛合金薄壁零件全致密且组织成分均匀,最终获得尺寸精确控制的全致密钛合金复杂薄壁零件;不仅解决了传统凝胶注模孔隙率高,致密度低的问题;还能够同时根据产品需要,按照特定牌号的钛合金成分比例熔渗低熔点金属粉末,实现特定成分制备致密精确的钛合金零件。

[0108] 本发明制备过程中,钛粉末的装载量40-65vol.%、真空烧结温度1000-1200℃、放大比例1.04-1.18及孔隙度20-60%四者之间通过匹配协同制备全致密复杂形状钛合金薄壁零部件。

[0109] 此外,本发明的制备方法不仅仅局限于各种钛及钛合金,还适用于其它各种其他金属薄壁零部件的复杂致密成形,如钢、硬质合金、铜等。

[0110] 总之,本发明制备工艺简单,流程短,适用性强,脱脂效果好,低成本,解决了传统复杂形状钛合金制备成本高,工艺复杂,周期长等问题;且其烧结收缩系数在制备模具时就

已考虑,致密度通过刷覆低熔点金属粉末并熔渗来调节,所制备的复杂形状钛合金薄壁零部件全致密且组织均匀,适合全致密复杂形状钛合金薄壁零部件的工业大规模生产和推广。

[0111] 以上所述是本发明的优选实施方式,应当指出,对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明所述原理的前提下,还可以做出若干改进和润饰,这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。