



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107429332 A

(43)申请公布日 2017. 12. 01

(21)申请号 201580062372.X

(22)申请日 2015.11.16

(30)优先权数据

62/080,780 2014.11.17 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2017.05.17

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/US2015/060833 2015.11.16

(87)PCT国际申请的公布数据

W02016/081348 EN 2016.05.26

(71)申请人 奥科宁克公司

地址 美国宾夕法尼亚州

(72)发明人 L·M·卡拉宾 C·亚纳尔

D·W·赫德 W·王

(74)专利代理机构 北京市联德律师事务所

11361

代理人 黄大正 王璐

(51)Int.Cl.

G22C 21/00(2006.01)

G22C 1/02(2006.01)

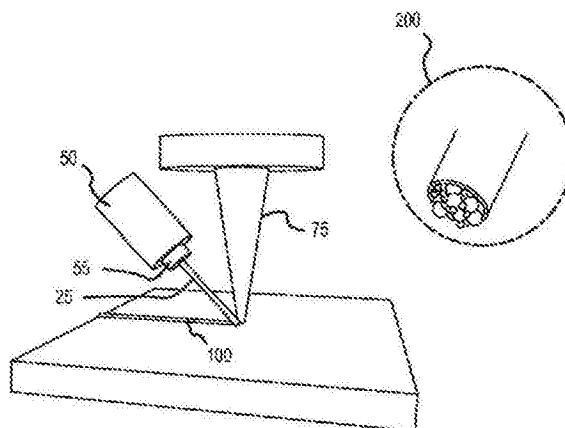
权利要求书2页 说明书6页 附图1页

(54)发明名称

含有铁、硅、钒和铜的铝合金

(57)摘要

本发明公开了含有铁、钒、硅和铜的新型铝合金。所述新型铝合金可包含3重量%至12重量%的Fe、0.1重量%至3重量%的V、0.1重量%至3重量%的Si,以及1.0重量%至6重量%的Cu,余量为铝和杂质。所述新型铝合金可通过增材制造技术制备,这可有利于所述铝合金熔池的快速固化。



1. 一种铝合金,基本由以下成分组成:
3重量%至12重量%的Fe;
0.1重量%至3重量%的V;
0.1重量%至3重量%的Si;以及
1.0重量%至6重量%的Cu;
余量为铝和杂质。
2. 一种由权利要求1所述的铝合金制成的铝合金主体。
3. 根据权利要求2所述的铝合金主体,其中所述铝合金主体是航空航天器的发动机部件的形式。
4. 根据权利要求2所述的铝合金主体,包含5体积%至35体积%的AlFeVSi弥散体。
5. 根据权利要求4所述的铝合金主体,其中所述AlFeVSi弥散体至少包含一些铜。
6. 根据权利要求2所述的铝合金主体,包括含铁和铜的微孔结构。
7. 一种制备铝合金主体的方法,包括:
(a) 使粉末分散于粉床中,其中所述粉末基本由以下成分组成:
3重量%至12重量%的Fe;
0.1重量%至3重量%的V;
0.1重量%至3重量%的Si;以及
1.0重量%至6重量%的Cu,
余量为铝(Al)和杂质;
(b) 选择性地将所述粉末的一部分加热到要形成的所述特定铝合金主体的液相线温度以上的温度;
(c) 形成含有Fe、V、Si、Cu和Al的熔池;
(d) 以至少1000℃每秒的冷却速率冷却所述熔池;以及
(e) 重复步骤(a)-(d)以形成增材制造的铝合金主体。
8. 根据权利要求7所述的方法,包括:
完成所述增材制造的铝合金主体,从而实现最终铝合金产品;
自然老化所述最终铝合金产品;以及
在所述自然老化之后,人工老化所述最终铝合金产品。
9. 根据权利要求8所述的方法,包括:
在所述自然老化步骤之后,使所述最终铝合金产品变形1%至10%。
10. 根据权利要求8或9所述的方法,其中所述人工老化包括:
在125℃至300℃的温度下加热所述最终铝合金产品并持续2至48小时。
11. 根据权利要求10所述的方法,其中所述最终铝合金产品是航空航天器或机动车辆的发动机部件的形式,其中所述方法包括:
将所述发动机部件组装到所述航空航天器或机动车辆中。
12. 根据权利要求11所述的方法,包括:
操作所述航空航天器或机动车辆。
13. 根据权利要求11所述的方法,其中所述最终铝合金产品是用于涡轮增压器的压缩机叶轮。

14. 根据权利要求11所述的方法,其中所述最终铝合金产品是用于涡轮的叶片。
15. 根据权利要求11所述的方法,其中所述最终铝合金产品是热交换器。

含有铁、硅、钒和铜的铝合金

背景技术

[0001] 铝合金可用于各种各样的应用。然而,许多铝合金在暴露于升高的温度时强度往往会降低。

发明内容

[0002] 广义地,本发明涉及含有铁、硅、钒和铜的新型铝合金主体。铝合金主体中所含铁(Fe)、硅(Si)和钒(V)的量可足以提供至少5体积%的AlFeVSi弥散体。铝合金主体中所含铜(Cu)的量可足以实现至少0.25体积%的Al₂Cu沉淀物和/或弥散强化剂(例如,如果铜与Fe、V或Si在弥散相中或在微孔结构中组合的话)。AlFeVSi弥散体可在高温应用(例如,用于航空航天和/或汽车应用)中有利于强度保持。任何Al₂Cu沉淀可有利于沉淀硬化,并且任何含铜弥散强化剂可有利于弥散硬化,从而增加铝合金主体的强度。此外,Al₂Cu沉淀物和/或含铜弥散体可抵抗高温下的粗化,还可进一步改善铝合金主体的高温性能。就这一点而言,新型铝合金主体通常包含以下成分(并且在一些情况下,基本由以下成分组成):3重量%至12重量%的Fe、0.1重量%至3重量%的V、0.1重量%至3重量%的Si;以及1.0重量%至6重量%的Cu,余量为铝和杂质。

[0003] 铝合金主体中铁、硅和钒的量可相对于AlFeVSi弥散体的所需量而变化,但铝合金主体中所含铁、硅和钒的量可足以提供至少5体积%的AlFeVSi弥散体,以及最多至35体积%的AlFeVSi弥散体。通过以金相法制备穿过最终部件的横截面,使用配有适当图像分析软件的扫描电镜(SEM)来确定铝合金主体中AlFeVSi弥散体的量,以测量AlFeVSi弥散相的面积分数,并且如果合适,辅以配有适当图像分析软件的透射电子显微镜(TEM)分析最终部件的箔片。AlFeVSi弥散体通常具有约40nm至约500nm的平均粒度。优选的是,最终产品中AlFeVSi弥散体的平均粒度趋向于该范围的下端。在一个实施例中,AlFeVSi弥散体具有不大于约250nm的平均粒度。在另一个实施例中,AlFeVSi弥散体具有不大于约200nm的平均粒度。在又一个实施例中,AlFeVSi弥散体具有不大于约150nm的平均粒度。在另一个实施例中,AlFeVSi弥散体具有不大于约100nm的平均粒度。在又一个实施例中,AlFeVSi弥散体具有不大于约75nm的平均粒度。在另一个实施例中,AlFeVSi弥散体具有不大于约60nm的平均粒度。

[0004] 在一个实施例中,铝合金主体中所含铁、硅和钒的量足以提供至少10体积%的AlFeVSi弥散体。在另一个实施例中,铝合金主体中所含铁、硅和钒的量足以提供至少15体积%的AlFeVSi弥散体。在又一个实施例中,铝合金主体中所含铁、硅和钒的量足以提供至少20体积%的AlFeVSi弥散体。在另一个实施例中,铝合金主体中所含铁、硅和钒的量足以提供至少25体积%的AlFeVSi弥散体。在又一个实施例中,铝合金主体中所含铁、硅和钒的量足以提供至少30体积%的AlFeVSi弥散体。在一个实施例中,铝合金主体含有25+/-3体积%的AlFeVSi弥散体。在一些实施例中,AlFeVSi弥散体中包含至少一些铜(例如,占弥散体的1重量%至5重量%),如通过微探针分析所测量的。

[0005] 在一个实施例中,新型铝合金主体包含4重量%至11重量%的Fe。在另一个实施例

中,新型铝合金主体包含5重量%至10重量%的Fe。在又一个实施例中,新型铝合金主体包含6重量%至9.5重量%的Fe。在另一个实施例中,新型铝合金主体包含6.5重量%至9.0重量%的Fe。在另一个实施例中,新型铝合金主体包含约8.5重量%的Fe。除铝之外,铁通常是该铝合金主体的主要合金元素。

[0006] 在一个实施例中,新型铝合金主体包含0.25重量%至3重量%的V。在另一个实施例中,新型铝合金主体包含0.5重量%至3重量%的V。在又一个实施例中,新型铝合金主体包含0.75重量%至2.75重量%的V。在另一个实施例中,新型铝合金主体包含1.0重量%至2.50重量%的V。在又一个实施例中,新型铝合金主体包含1.0重量%至2.25重量%的V。在另一个实施例中,新型铝合金主体包含1.0重量%至2.0重量%的V。在又一个实施例中,新型铝合金主体包含约1.5重量%的V。

[0007] 在一个实施例中,新型铝合金主体包含0.25重量%至3重量%的Si。在另一个实施例中,新型铝合金主体包含0.5重量%至3重量%的Si。在又一个实施例中,新型铝合金主体包含0.75重量%至2.75重量%的Si。在另一个实施例中,新型铝合金主体包含1.0重量%至2.50重量%的Si。在又一个实施例中,新型铝合金主体包含1.25重量%至2.50重量%的Si。在另一个实施例中,新型铝合金主体包含1.25重量%至2.25重量%的Si。在又一个实施例中,新型铝合金主体包含约1.7重量%的Si。在一个实施例中,铝合金主体中硅的量超过钒的量。

[0008] 铝合金主体中铜的量可相对于 Al_2Cu 沉淀物和/或含铜弥散强化剂的所需量而变化。在一个实施例中,新型铝合金主体包含1.0重量%至5.5重量%的Cu。在另一个实施例中,新型铝合金主体包含1.5重量%至5.0重量%的Cu。在又一个实施例中,新型铝合金主体包含2.0重量%至4.5重量%的Cu。在另一个实施例中,新型铝合金主体包含2.5重量%至4.5重量%的Cu。在又一个实施例中,新型铝合金主体包含3.0重量%至4.5重量%的Cu。在另一个实施例中,新型铝合金主体包含3.0重量%至4.0重量%的Cu。在另一个实施例中,新型铝合金主体包含约3.5重量%的Cu。

[0009] 在一个实施例中,铝合金主体中所含铜的量可足以提供至少0.25体积%的 Al_2Cu 沉淀物,以及最多至6.5体积%的 Al_2Cu 沉淀物。 Al_2Cu 沉淀物可处于平衡(非共格)状态,有时被本领域技术人员称为“ θ 相”,或者 Al_2Cu 沉淀物可处于非平衡(共格)状态,有时被本领域技术人员称为 θ' 相。在不存在银的情况下, Al_2Cu 沉淀物中的一些可位于铝合金晶粒的 $\{100\}$ 平面(FCC)上。当合金中使用银时,如下所述, Al_2Cu 沉淀物中的至少一些还可位于或另选地位于铝合金晶粒的 $\{111\}$ 平面(FCC)上。如上所述,通过SEM和/或TEM测定铝合金主体中 Al_2Cu 沉淀物的量。在一个实施例中,铝合金主体中所含铜的量可足以提供至少0.50体积%的 Al_2Cu 沉淀物,以及最多至6.5体积%的 Al_2Cu 沉淀物。在另一个实施例中,铝合金主体中所含铜的量可足以提供至少1.0体积%的 Al_2Cu 沉淀物,以及最多至6.5体积%的 Al_2Cu 沉淀物。在又一个实施例中,铝合金主体中所含铜的量可足以提供至少1.5体积%的 Al_2Cu 沉淀,以及最多至6.5体积%的 Al_2Cu 沉淀物。在另一个实施例中,铝合金主体中所含铜的量可足以提供至少2.0体积%的 Al_2Cu 沉淀物,以及最多至6.5体积%的 Al_2Cu 沉淀物。在又一个实施例中,铝合金主体中所含铜的量可足以提供至少2.5体积%的 Al_2Cu 沉淀,以及最多至6.5体积%的 Al_2Cu 沉淀物。在另一个实施例中,铝合金主体中所含铜的量可足以提供至少3.0体积%的 Al_2Cu 沉淀物,以及最多至6.5体积%的 Al_2Cu 沉淀物。在又一个实施例中,铝合金主

体中所含铜的量可足以提供至少3.5体积%的 Al_2Cu 沉淀,以及最多至6.5体积%的 Al_2Cu 沉淀物。在另一个实施例中,铝合金主体中所含铜的量可足以提供至少4.0体积%的 Al_2Cu 沉淀物,以及最多至6.5体积%的 Al_2Cu 沉淀物。在又一个实施例中,铝合金主体中所含铜的量可足以提供至少4.5体积%的 Al_2Cu 沉淀,以及最多至6.5体积%的 Al_2Cu 沉淀物。在另一个实施例中,铝合金主体中所含铜的量可足以提供至少5.0体积%的 Al_2Cu 沉淀物,以及最多至6.5体积%的 Al_2Cu 沉淀物。在又一个实施例中,铝合金主体中所含铜的量可足以提供至少5.5体积%的 Al_2Cu 沉淀,以及最多至6.5体积%的 Al_2Cu 沉淀物。

[0010] 在另一个实施例中,铝合金主体可包括铝基体内的微孔结构,并且铜(Cu)可部分地构成该微孔结构。例如,铜可与铁和/或硅组合以在铝基体内形成微孔结构。微孔结构可包括例如1-10重量%的Cu。

[0011] 下表1列出了各种本发明的合金组成(所有值均为重量百分比)。

[0012] 表1-本发明的合金组成

[0013]

合金	Fe (Fe>Cu、V、Si)	V	Si	Cu	余量
E1	3-12	0.1-3	0.1-3	1.0-6	Al和杂质
E2	4-11	0.25-3	0.25-3	1.0-5.5	Al和杂质
E3	5-10	0.5-3	0.5-3	1.5-5.0	Al和杂质
E4	6-9.5	0.75-2.75	0.75-2.75	2.0-4.5	Al和杂质
E5	6.5-9.5	1.0-2.5	1.0-2.5 $\text{Si} \geq \text{V}$	2.5-4.5	Al和杂质
E6	6.5-9.0	1.0-2.25	1.25-2.5 $\text{Si} \geq \text{V}$	3.0-4.5	Al和杂质
E7	6.5-9.0	1.0-2.0	1.25-2.25 $\text{Si} > \text{V}$	3.0-4.0	Al和杂质
E8	8.5+/-0.75	1.5+/-0.25	1.7+/-0.25 $\text{Si} > \text{V}$	3.5+/-0.35	Al和杂质

[0014] 关于杂质,当铝合金主体不含银(<0.10重量%的Ag)时,铝合金主体通常足以不含镁(Mg),以限制/避免形成S相(Al_2CuMg)沉淀物,其在高温应用中通常是有害的。镁的存在还可降低铝合金主体中 Al_2Cu 沉淀物的量。就这一点而言,当铝合金主体不含银时,铝合金主体通常含有不超过0.30重量%的Mg。在一个实施例中,铝合金主体是不含银的,并且含不超过0.20重量%的Mg。在另一个实施例中,铝合金主体是不含银的,并且含不超过0.15重量%的Mg。在又一个实施例中,铝合金主体是不含银的,并且含不超过0.10重量%的Mg。

[0015] 银可任选包含在铝合金主体中。当包含银时,铝合金还应包含一定量的镁,其有利于在铝合金晶粒的一个或多个{111}平面上生成 Al_2Cu 沉淀物。在一个实施例中,铝合金主体含有足量的银和镁,以使得在铝合金晶粒的一个或多个{111}平面上生成至少一些 Al_2Cu 沉淀物,但要限制银和镁的量,以避免或限制不期望的相,诸如S相。就这一点而言,铝合金主体可包含0.10-1.0重量%的Ag和0.10-1.0重量%的Mg,其中该相对量受限,以避免或限制不期望的相,诸如S相。

[0016] 铝合金主体通常足以不含锌(Zn),以限制/避免形成 η 相(MgZn_2)沉淀,其在高温应用中通常是有害的。就这一点而言,铝合金主体通常含不超过0.5重量%的Zn。在一个实施例中,铝合金主体含不超过0.35重量%的Zn。在另一个实施例中,铝合金主体含不超过0.25

重量%的Zn。在又一个实施例中,铝合金主体含不超过0.15重量%的Zn。在另一个实施例中,铝合金主体含不超过0.10重量%的Zn。在又一个实施例中,铝合金主体含不超过0.05重量%的Zn。在另一个实施例中,铝合金主体含不超过0.01重量%的Zn。在又一个实施例中,铝合金主体含少于0.01重量%的Zn。

[0017] 新型铝合金主体通常通过以下方法制备,该方法有利于将包含Al、Fe、V、Si和Cu的粉末选择性地加热到要形成的特定铝合金主体的液相线温度之上,从而形成含有Al、Fe、V、Si和Cu的熔池,然后使熔池快速固化。快速固化可有利于使至少一些铜保持在固溶体中。

[0018] 在一个实施例中,通过诸如选择性激光烧结(SLS)、选择性激光熔化(SLM)和电子束熔化(EBM)等增材制造技术来制备新型铝合金主体。增材制造技术有利于将包含Al、Fe、V、Si和Cu的粉末选择性地加热到特定铝合金的液相线温度之上,从而形成含有Al、Fe、V、Si和Cu的熔池,然后使熔池快速固化。

[0019] 在一个实施例中,一种方法包括(a)将包含Al、Fe、V、Si和Cu的粉末分散在粉床中,(b)选择性地粉末的一部分(例如通过激光)加热到要形成的特定铝合金主体的液相线温度之上,(c)形成含有Al、Fe、V、Si和Cu的熔池,以及(d)以1000°C/秒的冷却速率冷却熔池。在一个实施例中,冷却速率至少为10,000°C/秒。在另一个实施例中,冷却速率至少为100,000°C/秒。在另一个实施例中,冷却速率至少为1,000,000°C/秒。可根据需要重复步骤(a)-(d),直至铝合金主体完成为止,即直至形成/完成最终增材制造的铝合金主体。最终铝合金主体可具有至少5体积%的AlFeVSi弥散体,以及最多至35体积%的AlFeVSi弥散体。最终铝合金主体可具有复杂的几何形状,或者可为简单的几何形状(例如,片或板的形式)。

[0020] 用于增材制造中的粉末的颗粒可通过任何合适方法获得或形成。在一个实施例中,使用Al、Fe、V、Si和Cu每一者的离散且不同的颗粒(即,获得Fe颗粒、V颗粒、Si颗粒和Cu颗粒并以合适的量提供给粉床)。在另一个实施例中,通常使用均匀的颗粒,其中颗粒通常包含Al、Fe、V、Si和Cu中的全部。在该实施例中,可通过将包含所需量的Al、Fe、V、Si和Cu的熔融金属雾化来产生大致均匀的颗粒。

[0021] 在一种方法中,使用电子束(EB)技术来制备铝合金主体。电子束技术可有利于制备比容易通过激光增材制造技术制备的部件更大的部件。例如,并且现在参照图1,在一个实施例中,一种方法包括将小直径线材25(例如,直径 $\leq 2.54\text{mm}$ 的管材)供料到电子束枪50的喂料部分。线材25可以具有如上所述的铝合金组成,只要其为可拉伸组合物即可(例如,当根据美国专利号5,286,577的工艺条件制备时)。电子束75根据情况将该线材或管材加热到要形成的铝合金部件的液相线温度之上,然后使熔池快速固化以形成沉积的铝合金材料100(例如,具有至少5体积%的AlFeVSi弥散体和最多至35体积%的AlFeVSi弥散体的铝合金主体)。在一个实施例中,线材25是粉末芯线材200,其中管材在管中可包括上述铝合金组合物的颗粒,而管的外壳可包含铝或高纯度铝合金(例如,合适的1xxx铝合金)。

[0022] 快速固化(冷却)步骤完成后,可任选使最终铝合金主体自然老化,任选进行冷加工,然后人工老化。自然老化可持续足够时间,以稳定铝合金主体的性能(例如,持续数天)。任选的冷加工步骤可包括使铝合金主体变形1-10%(例如,通过压缩或拉伸)。铝合金主体可人工老化(例如,以形成 Al_2Cu 沉淀物,以使得铝合金主体包含0.25体积%至6.5体积%的 Al_2Cu 沉淀物和/或含铜弥散体)。人工老化可在一定温度下持续一段时间,以足以形成所需量的 Al_2Cu 沉淀物和/或含铜弥散体(例如,在125°C至200°C的温度下人工老化2至48小时或

更长,酌情执行)。人工老化可以是单个步骤,或者可以是多步骤人工老化操作。在一个实施例中,可使用更高温度,例如以潜在地改良(例如,球化)(如果适用)AlFeVSi弥散体中的至少一些(例如,可能高达300℃,前提条件是该较高温度不会过度粗化Al₂Cu颗粒和/或含铜弥散体)。在一些情况下,可将最终铝合金主体退火,然后缓慢冷却。退火可松弛微观结构。退火可在例如在冷加工之前,或在人工老化之前或之后发生。在一些情况下,可将最终铝合金主体进行溶液加热处理,然后淬火,之后可完成任何自然老化,任选的冷加工以及人工老化。溶液加热处理和淬火可通过使至少一些铜与铝处于固溶体中来有利于例如增加Al₂Cu沉淀物的体积分数。

[0023] 虽然本发明的铝合金通常在本文中被描述为含有铁和钒作为合金元素,但据信可使用各种替代物来代替铁和钒。例如,据信钴(Co)、锰(Mn)和镍(Ni)可全部或部分地代替铁,并且以任何组合形式,只要形成类似于AlFeVSi弥散体的弥散体即可。铬(Cr)、钼(Mo)和铌(Nb)可部分代替铁(例如,可能最高至约5重量%),并且以任何组合形式,只要形成类似于AlFeVSi弥散体的弥散体即可。关于钒,据信铪(Hf)、锆(Zr)、钪(Sc)、铬(Cr)或钛(Ti)中的任一种可全部或部分地代替钒,并且以任何组合形式,只要形成类似于AlFeVSi弥散体的弥散体即可。

[0024] 新型铝合金主体可用于多种应用中,例如用于航空航天或机动车辆的高温应用及其他应用。在一个实施例中,新型铝合金主体用作航空航天器中的发动机部件(例如,以叶片形式,诸如装配到发动机中的压缩机叶片)。在另一个实施例中,新型铝合金主体用作航空航天器发动机的热交换器。随后可操作包括该发动机部件/热交换器的航空航天器。在一个实施例中,新型铝合金主体是汽车发动机部件。随后可操作包括该发动机部件的机动车辆。例如,新型铝合金主体可用作涡轮增压器部件(例如,涡轮增压器的压缩机叶轮,其中由于将发动机排气回流通过涡轮增压器可实现高温),并且可操作包括该涡轮增压器部件的机动车辆。在另一个实施例中,铝合金主体可用作发电的陆基(固定)涡轮机中的叶片,并且可操作包含该铝合金主体的陆基涡轮机以有利于发电。

附图说明

[0025] 图1是用于制备增材制造铝合金主体的电子束装置的实施例的示意性透视图。

[0026] 图2(A)和图2(B)是完工状态下Al-Fe-V-Si-Cu合金的扫描电子图像;图2(A)示出了Al-Fe-V-Si弥散体的精细分布;图2(B)示出了包含Fe和Cu的微孔结构。

具体实施方式

[0027] 实例1

[0028] 使用Al-Fe-V-Si-Cu铸锭作为原料,并进行惰性气体雾化处理以产生粉末。然后将粉末筛分并混合,用于制备增材制造产品。使用EOS M280机器通过粉床熔融(PBF)来增材制造产品。通过电感耦合等离子体(ICP)对粉末和完工状态部件(最终产品)进行化学分析,结果示于下表2,(所有值均为重量百分比)。

[0029] 表2-组成

[0030]	项目	Fe	V	Si	Cu	余量*
	起始粉末	8.14	1.48	1.66	2.10	Al 和杂质。
	完工状态部件**	8.08 +/-0.13	1.46 +/-0.02	1.65 +/-0.02	2.09 +/-0.03	Al 和杂质。

[0031] *每种杂质少于0.03重量%，并且总量少于0.10重量%。

[0032] **24种完工状态部件的平均组成，标准偏差示出为+/-。

[0033] 根据NIST标准使用阿基米德密度分析程序确定完工状态部件的密度。阿基米德密度分析表明，在完工状态部件中获得超过理论密度的99%的密度。

[0034] 通过光学金相(OM)、扫描电镜(SEM)、电子探针微量分析(EPMA)和透射电子显微镜(TEM)分析完工状态部件的微观结构。通过将完工状态部件的截段安装在Bakelite中然后使用抛光介质的组合进行打磨抛光制备试件，并对该试件进行OM。OM分析表明，样本中存在小于1%的孔隙度，从而证实了阿基米德密度的结果。

[0035] 使用制备用于OM分析的相同试件进行SEM成像，结果表明存在球状弥散体相(即，细颗粒，不能重新溶解回固体中)和细微孔相，其代表性图像在图2(A)和图2(B)中示出。对这些试件中的一者进行图像分析，以确定弥散体相的粒度分布和体积分数。使用面积>100 μm^2 的单个图像进行图像分析。所得分析表明，弥散体的直径为约30至400nm，平均值为约75nm。还确定弥散体的体积分数为约6.7%。EPMA显示，细弥散体富含铁(Fe)和钒(V)，并且据信是 $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 类型。

[0036] 采用透射电子显微镜(TEM)来测定微孔壁的组成。通过以下方式由完工状态试件和经热处理的试件(在约375°F下处理约18小时)制备电子透明TEM箔片：以机械方式使试件变薄，然后使用由硝酸(HNO_3)和甲醇组成的溶液进行最终电喷抛光步骤，施加的电压为20-30伏。TEM分析表明微孔壁富含铜(Cu)和铁(Fe)。

[0037] 虽然已详细描述本发明的各种实施例，但这些实施例的修改和调整对于本领域的技术人员而言是显而易见的。然而，应当理解，此类修改和改型还是在本公开的精神和范围内。

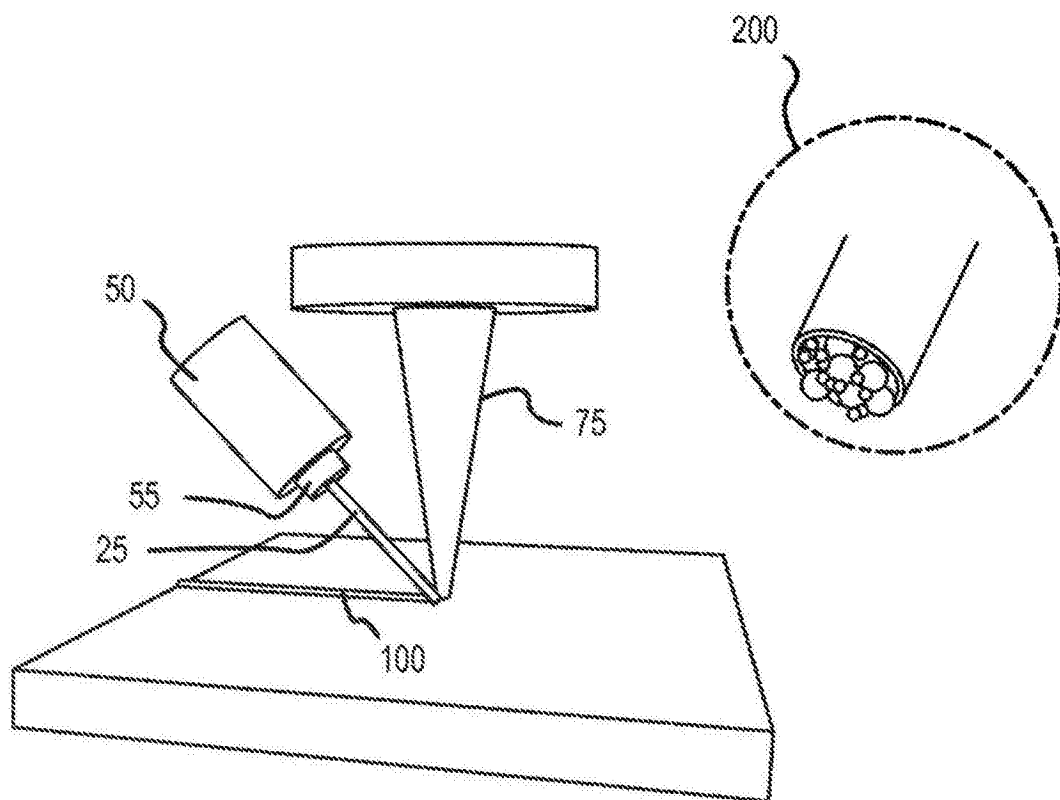


图1

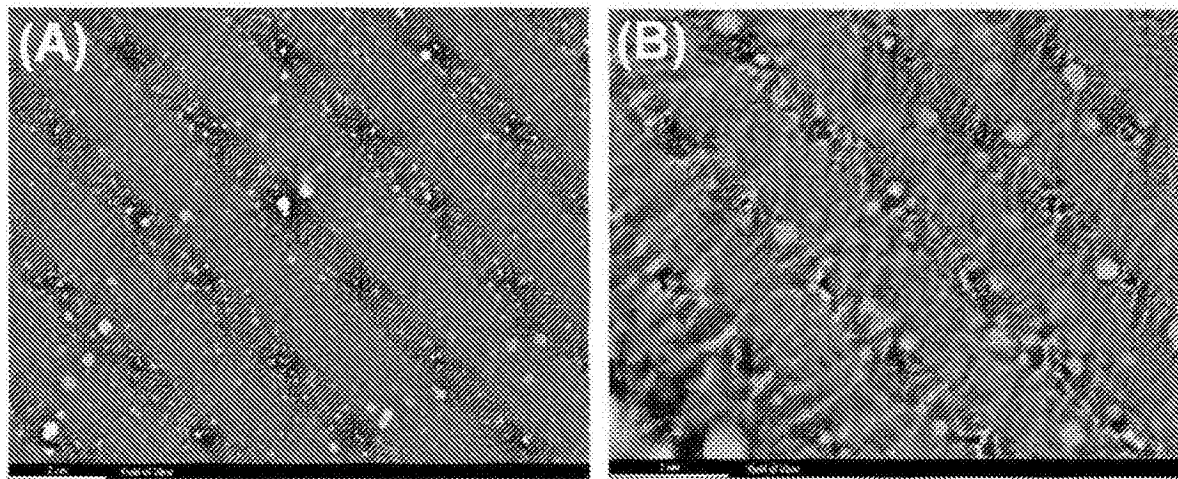


图2