



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102741435 A

(43) 申请公布日 2012. 10. 17

(21) 申请号 201180008238. 3

C22F 1/16 (2006. 01)

(22) 申请日 2011. 01. 24

C22F 1/10 (2006. 01)

(30) 优先权数据

12/700, 954 2010. 02. 05 US

(85) PCT申请进入国家阶段日

2012. 08. 03

(86) PCT申请的申请数据

PCT/US2011/022209 2011. 01. 24

(87) PCT申请的公布数据

W02011/097084 EN 2011. 08. 11

(71) 申请人 ATI 资产公司

地址 美国俄勒冈州

(72) 发明人 R. S. 米尼桑德拉姆

(74) 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

11105

代理人 张平元

(51) Int. Cl.

C22B 9/20 (2006. 01)

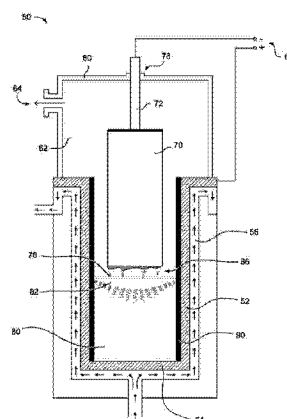
权利要求书 2 页 说明书 13 页 附图 11 页

(54) 发明名称

用于形成和处理合金锭的系统和方法

(57) 摘要

公开了涉及制造、加工和热加工合金锭的工艺及方法。形成了合金锭,其包括内部锭芯和冶金结合于所述内部锭芯的外层。所述工艺及方法的特征为降低热加工期间所述合金锭的表面破裂的发生率。



1. 一种用于形成合金锭的工艺,其包括:
将合金衬垫置于真空电弧重熔设备的坩埚中;及
将合金电极真空电弧重熔于所述坩埚的合金衬垫中,由此形成包含冶金结合于内部锭芯的外层的合金锭。
2. 如权利要求1所述的工艺,其中所述合金衬垫包含比包含所述合金电极的合金更具延展性的合金。
3. 如权利要求1所述的工艺,其中所述合金电极包含选自由镍基合金、铁基合金、镍-铁基合金和钴基合金组成的组的合金。
4. 如权利要求1所述的工艺,其中所述合金电极包含选自由合金718、合金720、Rene 41™、Rene 88™合金和Waspaloy®合金组成的组的合金。
5. 如权利要求1所述的工艺,其中所述合金衬垫包含镍基合金。
6. 如权利要求1所述的工艺,其还包括:
热加工所述合金锭,其中所述热加工包括施力于所述外层上,并且其中所述力使所述合金锭塑性变形。
7. 如权利要求6所述的工艺,其中热加工所述合金锭包括锻造及拉拔锻造所述合金锭。
8. 如权利要求6所述的工艺,其还包括在热加工所述合金锭后从所述合金锭移除所述外层的至少一部分。
9. 如权利要求6所述的工艺,其中所述工艺提高由镍基超合金锭形成的经锻造镍基超合金产品的产量。
10. 如权利要求6所述的工艺,其中所述工艺由浇铸镍基超合金锭制造经锻造的镍基超合金坯段。
11. 如权利要求1所述的工艺,其还包括使用真空感应熔炼操作提供所述合金电极。
12. 如权利要求1所述的工艺,其还包括使用真空感应熔炼-电渣精炼操作提供所述合金电极。
13. 一种合金锭,其通过权利要求1所述的工艺形成。
14. 一种用于加工合金锭的方法,其包括:
施加力于合金锭以使所述合金锭塑性变形;
其中所述锭包含冶金结合于内部锭芯的外层,以及
其中所述外层包含比包含所述内部锭芯的合金更具延展性的合金,并且其中所述外层降低所述合金锭的表面破裂的发生率。
15. 如权利要求14所述的方法,其还包括在使所述合金锭变形后从所述合金锭移除所述外层的至少一部分。
16. 如权利要求14所述的方法,其中所述内部锭芯包含选自由镍基合金、铁基合金、镍-铁基合金和钴基合金组成的组的合金。
17. 如权利要求14所述的方法,其中所述内部锭芯包含选自由合金718、合金720、Rene 41™合金、Rene 88™合金和Waspaloy®合金组成的组的合金。
18. 如权利要求14所述的方法,其中所述内部锭芯包含镍基超合金并且所述外区域包

含镍基合金。

19. 如权利要求 14 所述的方法,其中施加力于所述合金锭包括镦锻及拉拔锻造所述合金锭。

20. 如权利要求 14 所述的方法,其中所述方法提高由镍基超合金锭形成的经锻造镍基超合金产品的产量。

21. 如权利要求 14 所述的方法,其中所述方法由浇铸镍基超合金锭制造经锻造的镍基超合金坯段。

22. 一种经热加工的制品,其通过权利要求 14 所述的方法由合金锭形成。

用于形成和处理合金锭的系统和方法

技术领域

[0001] 本发明公开一种用于形成合金锭的系统、设备及工艺。本发明也涉及一种用于加工合金锭的系统、设备及方法。本发明进一步涉及如本文所述形成及加工的合金锭及其它制品。

[0002] 背景

[0003] 金属合金产品（例如）可使用锭冶金操作制得。锭冶金操作包括熔合金原料并浇铸经熔融的材料以形成一锭。锭冶金操作的非限制性实例是“三重熔化 (triple melt)”技术，其包括三种熔化操作：(1) 真空感应熔炼 (VIM)，由原料制备所需合金组合物；(2) 电渣精炼 (ESR)，其可降低（例如）含氧包合体 (inclusion) 的含量，及 (3) 真空电弧重熔 (VAR)，其可降低 ESR 后挥发性合金组份的含量及减少固化期间可发生的组成分离。

[0004] 可热加工由锭冶金操作形成的合金锭以制造其它合金产品。例如，固化形成合金锭后，该锭经受锻造和 / 或挤压以由该锭形成坯段或其它合金制品。

[0005] 概述

[0006] 本文所公开的实施方案涉及一种用于形成合金锭的工艺。该工艺包括将合金衬垫置于供真空电弧重熔设备使用的坩埚中。将合金电极重熔于真空电弧重熔设备中。使该合金电极真空电弧重熔于该坩埚的合金衬垫中。如此，形成合金锭，其包含冶金结合于内部锭芯的外层。

[0007] 其它实施方案涉及一种用于加工合金锭的方法。该方法包含对合金锭施力以使该合金锭变形。该合金锭包含冶金结合于内部锭芯的外层。该外层包含较包含内部锭芯的该合金更具延展性的合金。该外层降低施力于该合金锭期间该合金锭的表面破裂的发生率。

[0008] 应了解本文所公开及描述的本发明不限于此概述中所公开的实施方案。

[0009] 附图简述

[0010] 经由参照附图，可更好理解本文所公开及描述的非限制性实施方案的各种特征。

[0011] 图 1 是图示真空电弧重熔 (VAR) 设备的示意图；

[0012] 图 2 是图示 VAR 设备的示意图，该设备具有置于其坩埚中的合金衬垫；

[0013] 图 3 是图示真空电弧双电极重熔设备的示意图，该设备具有置于其坩埚中的合金衬垫；

[0014] 图 4A 及 4B 是具有冶金结合于内部锭芯的外层的圆柱形合金锭的示意图；图 4A 是该锭的端视图；图 4B 是该锭的透视图，其显示该外层经部分移除以露出该内部锭芯的下层表面；

[0015] 图 5A 是图示在合金锭上进行的拉拔锻造操作的示意图；图 5B 是图 5A 所示的锭在锻造后的横截面的示意图；图 5C 是图示在外层冶金结合于内部锭芯的合金锭上进行的拉拔锻造操作的示意图；图 5D 是图 5C 所示的锭在锻造后的横截面的示意图；

[0016] 图 6A 是图示在合金锭上进行的墩锻操作的示意图；图 6B 是图 6A 所示的锭在锻造后的横截面的示意图；图 6C 是图示在外层冶金结合于内部锭芯的合金锭上进行的墩锻操作的示意图；图 6D 是图 6C 所示的锭在锻造后的横截面的示意图；

[0017] 图 7 是外层冶金结合于内部锭芯的锭的宏观蚀刻截面的照片,其显示该锭的内部宏观结构;

[0018] 图 8A 是图 7 所示的锭的外层的光学显微照片;图 8B 是图 7 所示的锭的内部锭芯在外层与内部锭芯之间的接口内所取得的光学显微照片;图 8C 是图 7 所示的锭的内部锭芯在该锭内部的中心半径位置所取得的光学显微照片;图 8D 是图 7 所示的锭的外层与内部锭芯之间的接口的光学显微照片;及

[0019] 图 9 是图 7 与图 8A-8D 所示的锭的外层与内部锭芯之间的接口的 SEM 显微照片。

[0020] 考虑以下根据本发明的各种非限制性实施方案的详细描述时,读者将会意识到下述细节以及其它细节。于实施或利用本文所述的实施方案时,读者也可理解额外细节。

[0021] 非限制性实施方案的详述

[0022] 应了解,已简化本文所公开的实施方案的各种描述以仅阐述与明确了解所公开实施方案有关的那些特征、方面、特性等,而为了明晰的目的消除其它特征、方面、特性等。本领域普通技术人员于考虑本发明所公开的实施方案的描述时,将认识到在特定实施或应用所公开的实施方案中,其它特征、方面、特性等是可取的。然而,由于本领域普通技术人员于考虑本发明公开的实施方案描述时可轻易确定及实施此类其它特征、方面、特性等,故其等并非为全面了解所公开的实施方案所需要的,因此本文不提供此类特征、方面、特性等的描述。如此,应了解,本文所阐明的描述仅是示例性的并且说明所公开的实施方案,而非意欲限制如单独通过权利要求所界定的本发明的范围。

[0023] 在本发明中,除另有指明外,表示量或特性的所有数字皆应理解为在所有情况下是以术语“约”开始或被其修饰。因此,除另指明为相反外,阐明于以下描述的任何数字参数可依根据本发明实施方案中设法获得的所期望性质而变化。至少且并非试图限制等同于权利要求的教义的应用,本发明所述的各数字参数应至少鉴于所记录的有效数字及通过应用一般舍入技术而理解。

[0024] 此外,本文所述的任何数字范围意欲包括本文中所包含的所有子范围。例如,“1 至 10”的范围意欲包括介于所述最小值 1 及所述最大值 10 之间(及包括两者)的所有子范围,即具有等于或大于 1 的最小值及等于或小于 10 的最大值。本文所述的任何最大数字限制意欲包括其中所包含的所有较低数字限制并且本文所述的任何最小数字限制意欲包括其中所包含的所有较高数字限制。因此,申请人保有修改本发明(包括权利要求)的权利以明确陈述包含于本文所明确陈述的范围内的任何子范围。确定所有此类范围为本文所固有公开以使修改至明确陈述任何此类子范围将遵守 35U. S. C. § 112 第一段及 35U. S. C. § 132(a) 的要求。

[0025] 除另有指明外,如本文所用的语法冠词“一(one)”、“一(a)”、“一(an)”和“该(the)”意欲包括“至少一”或“一或多”。因此,本文所用冠词是指一个或多于一个(即至少一个)的冠词语法对象。举例而言,“一组件”意指一或多个组件,因此可考虑多于一个组件及多于一个组件可应用于或用于实施所述的实施方案。

[0026] 除另有指明外,据说以引用的方式并入本文中的任何专利、公布或其它公开材料是以整体并入本文中,但仅至所并入的材料不与本发明中明确阐明的既有定义、陈述或其它公开材料相冲突的程度。如此及至所需程度,如本文所阐明的表述内容替代以引用方式并入本文中的任何冲突材料。据说以引用的方式并入本文中但与本发明中明确阐明的既有

定义、陈述或其它公开材料相冲突的任何材料或其部分是仅以在所并入的材料及既有公开内容之间无冲突出现的程度并入。申请人保有修改本发明以明确陈述以引用方式并入本文中的任何主题或其部分的权利。

[0027] 本发明包括各种非限制性实例的描述。应了解本文所述的所有实施方案是例示性、说明性且非限制性。因此，本发明不受限于各种例示性、说明性及非限制性实例的描述。相反，本发明仅受权利要求所界定，该权利要求可经修改以陈述本发明中明确或固有描述或另外通过本发明明确或固有支持的任何特征。因此，任何此类修改将遵守 35 U. S. C. § 112 第一段及 35 U. S. C. § 132(a) 的要求。

[0028] 本文所公开及描述的各种非限制性实施方案可包括如本文不同描述的特征、方面、特性、限制等，由其组成或基本上由其组成。本文所公开及描述的各种非限制性实施方案也可包含本领域已知或于实践中实施时另外归入各种非限制性实施方案的额外或可选用特征、方面、特性、限制等。

[0029] 各种合金的特征为破裂敏感性 (crack sensitive)。在加工操作期间，破裂敏感性合金易形成裂纹。例如在用于由破裂敏感性合金锭制造合金制品的热加工操作期间，破裂敏感性合金锭（例如）可形成裂纹。例如，利用锻造转化，可由合金锭形成合金坯段。利用挤压或其它加工操作，可由合金坯段或合金锭形成其它合金制品。由于在热加工期间（例如，在锻造或挤压期间）合金锭发生表面破裂，故利用热加工操作，由破裂敏感性合金锭形成合金制品的生产率较低。产率可因需要自经加工的锭磨去或以其它方式移去表面裂纹而降低。

[0030] 如本文所用，术语“热加工”是指在大于环境温度的温度下对工件施力，其中所施加力使该工件塑性变形。

[0031] 在诸如（例如）锻造或挤压的热加工操作期间，由于合金锭表面因热损失至周围空气而冷却，故形成天然温度梯度。另外，经受加工操作的合金锭的温度可大于用于机械施力于锭表面的模具的温度。介于锭表面与锭内部分之间所产生的热梯度偏移可促进热加工期间该锭的表面破裂，尤其是由破裂敏感性合金形成的锭，诸如（例如）镍基、铁基、镍-铁基及钴基合金及超合金。

[0032] 一个减少热加工期间合金锭表面上的裂纹形成的方法是在热加工前将合金锭置入合金罐中。在圆柱形锭的情况下，例如合金罐的内径略大于合金锭的外径，由此允许锭插入该罐中。该罐松弛地包围该锭，利用空气间隙及辐射包体提供保温。在加工操作期间，模具与至少部分包围内部锭的外罐接触。如此，罐可热绝缘及机械保护经至少部分包围的锭的表面，此可降低加工期间锭的表面破裂的发生。

[0033] 锭装罐操作可引起各种缺点。罐外表面及加工模具间的机械接触可使罐破裂。例如，在锻造及拉拔锻造装罐锭期间，罐可于拉拔操作期间分裂。在这种情况下，在多次锻造及拉拔锻造操作的每次锻造及拉拔循环之间锭必须重新罐装，此增加工艺的复杂性及费用。此外，在加工操作期间，罐因视觉监控装罐锭表面的裂纹及其它加工引起的缺陷而伤害操作员。

[0034] 本文所公开的实施方案涉及一种用于形成合金锭的工艺及一种用于加工合金锭的方法。在各种非限制性实施方案中，一种用于形成合金锭的工艺可包括将合金衬垫置于供真空电弧重熔 (VAR) 设备使用的坩埚中。合金电极可真空电弧重熔于真空电弧重熔设备

中。该合金电极可真空电弧重熔于该坩埚的合金衬垫中。如此,可形成合金锭,其包含冶金结合于内部锭芯的外层。该外层包含最初包含衬垫(衬垫合金)的合金。内部锭芯包含最初包含 VAR 电极(电极合金)的合金。

[0035] 真空电弧重熔用于改良清洁度及精炼合金锭结构的锭冶金操作。在 VAR 操作中,待重熔的合金锭可称为合金电极。例如利用大气熔炼(例如在电弧炉(EAF))、真空熔炼(例如真空感应熔炼(VIM))、电渣精炼(ESR)、炉床熔化方法、喷涂成形法和/或其它熔化浇铸或锭形成操作可形成待熔于 VAR 操作中的合金电极。VAR 可包括可消耗性合金电极通过低于真空的电弧连续重熔。直流(DC)电源可电连接于合金电极及 VAR 设备中的坩埚的底板。DC 电源在合金电极的自由端及坩埚底板间击出一电弧。经由电弧释放的能量所产生的热量熔化电极的自由端。VAR 通常述于(例如)Donachie 等人的 Superalloys: A Technical Guide, ASM International, 2002 中,其引用的方式并入本文中。

[0036] 图 1 是说明 VAR 设备 10 的非限制性实施方案的示意图。VAR 设备 10 包括具有底板 14 的坩埚 12。坩埚 12 通过水夹套 16 水冷却。水夹套 16 包括允许水流经坩埚 12 的外表面的进水口及出水口。流经坩埚 12 的水移去坩埚 12 的热量,其接着自坩埚 12 内的熔融合金池 42 移去热量,因此有助于将熔融合金池 42 固化成真空电弧重熔锭 40。真空电弧重熔锭 40 通过坩埚 12 的内表面模制而成。流经坩埚 12 的水也移除锭 40 的热量。坩埚 12 与 VAR 头 20 紧密配合以形成密封炉室 22。VAR 头 20 包括真空口 24,其允许将炉室 22 内抽至真空。

[0037] 合金电极 30 的一末端是连接于延伸入 VAR 设备 10 的炉室 22 中的撞锤 32。撞锤 32 驱使电极 30 的自由端进入坩埚 12 的开放容积中。当合金电极 30 熔化并且熔融合金 36 经由电极弧隙 46 落入锭 40 的上表面的熔融合金池 42 中时,撞锤 32 使合金电极 30 垂直置于坩埚 12 中。如此,撞锤 32 可朝着底板 14 前进移动合金电极 30 并维持操作耐受度内的相对恒定电极弧隙 46。撞锤 32 可移动地放置穿过 VAR 头 20 中的密封开口 38 以使 VAR 操作期间可维持炉室 22 内的真空。

[0038] 由于经由最初形成于电极 30 的自由端与坩埚底板 14 之间的电弧释放能量所产生的热量,故合金电极 30 熔化。电极 30 及底板 14 电连接于电源 26。经由电极弧隙 46 电弧最初形成于电极 30 的自由端与底板 14 之间。熔融合金覆盖底板 14 并开始填充坩埚 12 内的开放容积后,撞锤 32 的垂直定位作用维持电极弧隙 46 与电极 30 的自由端与固化锭 40 之间所形成的电弧。

[0039] 图 2 是说明 VAR 设备 50 的非限制性实施方案的示意图。VAR 设备 50 包括具有底板 54 的坩埚 52。合金衬垫 90 置于坩埚 52 中。虽然图 2 显示合金衬垫 90 在两个相对末端处为开放,但在各种替代实施方案中,合金衬垫在位于 VAR 设备底板邻近的末端处为部分或完全封闭。坩埚 52 通过水夹套 56 水冷却。水夹套 56 包括允许水流经坩埚 52 的外表面的进水口及出水口。流经坩埚 52 的水移去坩埚 52 的热量,其接着自合金衬垫 90 及合金衬垫 90 内的熔融合金池 82 移去热量,因此有助于将熔融合金池 82 固化成真空电弧重熔内部锭芯 80。如此,形成合金锭,其包含冶金结合于内部锭芯的外层。外层包含最初包含合金衬垫 90 的材料及内部锭芯包含最初包含合金电极 70 的材料。坩埚 52 与 VAR 头 60 紧密配合以形成密封炉室 62。VAR 头 60 包括真空口 64,其允许将炉室 62 内抽至真空。

[0040] 合金电极 70 的一末端是连接于 VAR 设备 50 中的撞锤 72。撞锤 72 驱使电极 70 的

自由端进入合金衬垫 90 内的开放空间中。当合金电极 70 熔化并且熔融合金 76 穿过电极弧隙 86 滴入熔融合金池 82 中时, 撞锤 72 垂直定位合金电极 70 于合金衬垫 90 中。如此, 可控制撞锤 72 以维持操作耐受度内的相对恒定电极弧隙 86。撞锤 72 可移动地放置穿过 VAR 头 60 中的密封开口 78 以使 VAR 操作期间可维持炉室 62 内的真空。

[0041] 由于经由最初形成于电极 70 的自由端与坩埚底板 54 之间的电弧释放能量所产生的热量, 故合金电极 70 熔化。电极 70 及底板 54 电连接于电源 66。经由电极弧隙, 电弧最初形成于电极 70 的自由端与底板 54 之间。熔融合金覆盖坩埚的底板 54 并开始填充合金衬垫 90 内的容积后, 撞锤 72 的垂直定位作用维持电极弧隙 86 与电极 70 的自由端与固化锭 80 之间形成的电弧。如此, 合金电极 70 可真空电弧重熔于合金衬垫 90 中, 其位于真空电弧重熔设备 50 中的坩埚 52 中。

[0042] 如本文所用, 术语“真空电弧重熔”及“VAR”包括 VAR 的变体, 诸如 (例如) 真空电弧双电极重熔 (VADER)。图 3 是说明包含 VADER 设备的 VAR 设备 150 的非限制性实施方案的示意图。VAR 设备 150 包括具有底板 154 的坩埚 152。合金衬垫 190 置于坩埚 152 中。虽然图 3 显示在两个相对末端处为开放的合金衬垫 190, 但在各种替代实施方案中, 合金衬垫在位于 VAR 设备的底板邻近末端处可部分或完全封闭。坩埚 152 通过水夹套 156 水冷却。水夹套 156 包括允许水流经坩埚 152 的外表面的进水口及出水口。流经坩埚 152 的水移去坩埚 152 的热量, 其接着自合金衬垫 190 及合金衬垫 190 内的熔融合金池 182 移去热量, 因此有助于将熔融合金池 182 固化成真空电弧双电极重熔内部锭芯 180。如此, 形成合金锭, 其包含冶金结合于内部锭芯的外层。外层包含最初包含合金衬垫 190 的材料并且内部锭芯包含最初包含两个合金电极 170 的材料。坩埚 152 与 VAR 头 160 紧密配合以形成密封炉室 162。VAR 头 160 包括真空口 164, 其允许将炉室 162 内抽至真空。

[0043] 各合金电极 170 的一端是连接于 VAR 设备 150 中的撞锤 172。撞锤 172 驱使电极 170 的自由端朝向彼此以维持电极弧隙 186。当合金电极 170 熔化并且熔融合金 176 滴入熔融合金池 182 中时, 撞锤 172 相对彼此水平放置合金电极 170。如此, 可控制撞锤 172 以维持操作耐受度内的相对恒定电极弧隙 186。

[0044] 由于经由各电极 170 的自由端间形成的电弧释放能量所产生热量, 故合金电极 170 熔化。该电极 170 电连接于电源 (未显示)。经由电极弧隙 186, 电弧形成于电极 170 的自由端间。撞锤 172 的水平定位作用维持电极弧隙 186 和于电极 170 的自由端之间形成的电弧。如此, 合金电极 170 可真空电弧重熔于合金衬垫 190 中, 其位于 VAR 设备 150 的坩埚 152 中。

[0045] 在各种非限制性实施方案中, 一种用于形成合金锭的工艺可包括真空电弧重熔工艺。真空电弧重熔工艺可包括将合金衬垫置于真空电弧重熔设备的坩埚中。至少一合金电极可真空电弧重熔于该真空电弧重熔设备的该坩埚中所放置的合金衬垫里。当熔化电极合金液滴自合金电极熔化至位于合金衬垫内的熔池中, 热量可部分熔化邻近熔池区域的合金衬垫。当熔融合金及至少经部分熔化的衬垫合金固化于坩埚内时, 合金衬垫及经固化的电极合金熔融并冶金结合, 由此形成包含冶金结合于内部锭芯的外层的合金锭。锭的外层包含衬垫合金。锭的内部锭芯包含电极合金。

[0046] 图 4A 与 4B 是根据本文所述的各种非限制性实施方案形成的合金锭 200 的示意图。合金锭 200 包含冶金结合于内部锭芯 203 的外层 202。介于外层 202 与内部锭芯 203

之间的接口 205 包含形成于包含外层 202 的衬垫合金与包含内部锭芯 203 的电极合金之间的金属结合。

[0047] 在各种非限制性实施方案中,金属结合可包含衬垫合金(包含外层 202)与电极合金(包含内部锭芯 203)的内金属熔融或聚结。例如,当合金电极重熔于合金衬垫中时,熔融电极合金可熔融至合金衬垫的内表面,由此形成外层(包含衬垫合金)与内部锭芯(包含电极合金)间的冶金结合界面。通过熔融电极合金所携带的热能可至少部分熔合金衬垫的内表面,其可与熔融电极合金部分聚结,由此于固化时形成外层与内部锭芯之间的冶金结合接口。

[0048] 在各种非限制性实施方案中,金属结合可包含合金梯度区域,其中锭的组成沿电极合金组成至衬垫合金组成的梯度转变。由于在合金梯度区域中混合电极合金与衬垫合金,故形成合金梯度。当合金电极熔融于合金衬垫中时,经熔融的电极合金至少部分与至少一部分经熔融的衬垫合金混合,经熔融的衬垫合金由于熔入合金衬垫内的熔池的熔化电极合金液滴的热能而可至少部分熔化。如此,可形成锭,其包含由衬垫合金形成的外层,由电极合金形成的内部锭芯及由电极合金与衬垫合金的混合物形成的合金梯度区域,其特征为该混合物自电极合金转变为合金梯度区域内的衬垫合金。

[0049] 在各种实施方案中,外层(包括衬垫合金)与内部锭芯(包含电极合金)并未冶金结合在一起。例如,若衬垫合金的熔点温度远高于电极合金的熔点温度,则经熔融的电极合金将于合金衬垫内部固化而不使合金衬垫熔化或另外熔融至经固化的内部锭芯。如此,合金衬垫发挥作为模具的作用,其中电极合金固化于物理上与外层结合而非冶金结合于外层的内部锭芯中。

[0050] 在冶金结合的实施方案中,衬垫合金与电极合金的聚结或掺合程度及接着介于外层与内部锭芯间的接口区域的体积可(例如)通过选择具有指定熔点温度的相应合金控制。例如,若衬垫合金的熔点温度足够高于电极合金的熔点温度,则经熔融的电极合金将冶金熔融于合金衬垫的内表面,产生相对小的接口区域。

[0051] 然而,若衬垫合金的熔点温度远低于电极合金的熔点温度,则合金衬垫可完全融化并与经熔融的电极合金混合。由于其可明显改变所得锭的内部锭芯的化学作用,可能产生不合规的电极合金,故此可以是不需要的。在各种非限制性实施方案中,针对既定电极合金选择衬垫合金,该电极合金在外层与内部锭芯之间形成强烈冶金结合,但与经熔融的电极合金接触时,其也不会过度熔融。如此,包含内部锭芯的合金可保持于规格内。

[0052] 在各种非限制性实施方案中,电极合金(其随后包含内部锭芯)可包含破裂敏感性合金。例如,各种镍基、铁基、镍-铁基及钴基合金及超合金可以是破裂敏感性的,尤其于热加工操作期间。合金电极可由此类破裂敏感性合金及超合金形成。破裂敏感性金电极可由合金或超合金,包括(但不限于)合金 718、合金 720、Rene 41™、Rene 88™ 合金、Waspaloy® 合金及 Inconel® 100 合金形成。本文所述的实施方案通常适用于任何合金,此类合金的特征为在热加工温度下的相对低延展性。如本文所用,术语“合金”包括常规合金及超合金,其中超合金在高温下展现相对良好的表面稳定性、抗腐蚀及氧化能力、高强度及高抗蠕变性。

[0053] 衬垫合金(随后包含外层)可在欲使用的特定加工温度下比电极合金(及随后下层内部锭芯)更具延展性和/或可锻造的合金。衬垫合金可在热加工所形成的锭时所使用

的特定加工温度下比包含合金电极（及下层内部锭芯）的合金展现更大的韧性和 / 或更小硬度的合金。在各种非限制性实施方案中,外层隔离下层内部锭芯免于暴露于环境空气和 / 或与热加工模具表面接触,由此防止下层内部锭芯冷却至包含内部锭芯的电极合金在热加工期间变脆及更轻易破裂的温度。

[0054] 衬垫合金（及外层）可包含抗氧化的合金。在各种非限制性实施方案中,在热加工期间或其它情况,外层不氧化至可感知程度。外层可包含展现相对高刚性（例如相对低弹性模数）的合金。在各种非限制性实施方案中,在热加工期间,外层实质上不变薄（例如,通过一或多个模具施力将使相对低刚性的合金在下层内部锭芯上变薄）。

[0055] 在各种非限制性实施方案中,包含合金衬垫（及外层）的合金及包含合金电极（及下层内部锭芯）的合金可包含相同的基底金属。例如,如果合金电极（及内部锭芯）包含镍基合金或超合金（例如,合金 718、合金 720、Rene 88™ 合金、或 Waspaloy® 合金）,则合金衬垫（及外层）也可包含镍基合金,诸如（例如）合金 625。

[0056] 在各种非限制性实施方案中,包含合金衬垫（及外层）的合金及包含合金电极（及下层内部锭芯）的合金可包含不同的基底金属。例如,如果合金电极（及内部锭芯）包含镍基合金或超合金（例如,合金 718、合金 720、Rene 88™ 合金、或 Waspaloy® 合金）,则合金衬垫（及外层）可包含铁基合金,诸如（例如）304 型不锈钢。

[0057] 可选择合金衬垫的壁厚度以使可形成具有足以保护下层内部锭芯免于接触模具表面的厚度的外层,由此防止下层内部锭芯冷却至下层表面在热加工期间可更轻易破裂的温度。如此,更大的热加工温度通常与更大的外层厚度有关。在各种非限制性实施方案中,合金衬垫可具有 0.25 英寸至 0.5 英寸的壁厚度。

[0058] 利用锭冶金操作或粉末冶金操作可形成合金电极。例如,在各种非限制性实施方案中,通过 VIM 可形成合金电极。在各种非限制性实施方案中,通过 VIM-ESR 可形成合金电极。如此,根据各种非限制性实施方案的三重熔化工工艺可包含 VIM-ESR-VAR,其特征为 VAR 操作包括将合金电极（或 VADER 操作中的两个电极）熔于位于 VAR 设备的坩埚的合金衬垫中。在各种非限制性实施方案中,粉末冶金操作可包括雾化熔融合金和收集及固结经固化的冶金粉末成电极。粉末冶金操作的非限制性实施方案包括以下步骤:(1)VIM 由原料制备所需合金组合物;(2) 将熔融合金雾化成熔融合金液滴,其固化为合金粉末;(3) 任选地筛分合金粉末以减少包合体;(4) 装罐及脱气适量的合金粉末;及(5) 压缩合金粉末以固结合金粉末成合金电极。

[0059] 在各种非限制性实施方案中,末端层可沉积于具有冶金结合于内部锭芯的外层的合金锭的至少一末端上。例如,在将圆柱形合金电极重熔成管状合金衬垫以形成包含冶金结合于内部锭芯的外层的圆柱形合金锭后,内部锭芯可保持暴露于圆柱形锭的相对末端的一或两者上。合金材料的层可沉积于锭的相对末端的一或两者上的所暴露内部锭芯的至少一部分上。如此,圆柱形锭的内部锭芯可包含于外部圆周层内及圆柱形锭的一或两个末端上的一或多个末端层内。

[0060] 在各种非限制性实施方案中,末端层可沉积并且冶金结合于合金锭的相对末端的一或两者上。例如,合金末端层可以焊缝沉积物形式沉积于锭的末端表面上。利用焊接操作,包括（但不限于）金属惰性气体 (MIG) 焊接、钨惰性气体 (TIG) 焊接、电浆焊接、潜弧焊接及电子束焊接可将焊缝沉积物冶金结合于合金的末端表面的至少一区域。

[0061] 合金末端层可包含在欲使用的特定加工温度下比下层内部锭芯的合金更具延展性和 / 或可锻造的合金材料。合金末端层可包含在欲使用的特定加工温度下展现比下层内部锭芯的合金更大的韧性和 / 或更小硬度的合金材料。在各种非限制性实施方案中,合金末端层隔离内部锭芯的下层表面与接触模具的表面,由此防止下层表面冷却至该表面在热加工期间变脆及可更轻易破裂的温度。

[0062] 合金末端层可包含抗氧化的合金材料。在各种非限制性实施方案中,合金末端层在热加工期间或其它情况下不氧化。合金末端层可包含展现相对高刚性(例如相对低弹性模数)的合金材料。在各种非限制性实施方案中,在热加工期间,合金末端层实质上不变薄(例如,通过一或多个模具施力将使相对低刚性的金属材料在下层内部锭芯上变薄)。

[0063] 在各种非限制性实施方案中,形成末端层的合金材料及形成下层内部锭芯的合金可包含相同的基底金属。例如,若内部锭芯包含镍基合金或超合金(例如,合金 718、合金 720、Rene 88™ 合金或 Waspaloy® 合金),则末端层的合金材料也可包含镍基合金,诸如(例如)镍基焊接合金(例如,从 Techalloy Company/Central Wire 可得的 Techalloy 606TM 合金)。合金末端层可沉积至足以隔离内部锭芯的下层表面与接触模具的表面的厚度,由此防止下层表面冷却至该下层表面在热加工期间可更轻易破裂的温度。如此,更大的热加工温度通常可与更大的金属材料层厚度有关。在各种非限制性实施方案中,在合金锭的表面的至少一区域上,金属材料层可沉积至 0.25 英寸至 0.5 英寸的厚度。

[0064] 在各种非限制性实施方案中,形成冶金结合于内部锭芯的末端层的合金材料及形成冶金结合于该内部锭芯的外圆周层的合金材料可包含相同基底金属。在各种非限制性实施方案中,形成冶金结合于内部锭芯的末端层的合金材料及形成冶金结合于该内部锭芯的外圆周层的合金材料是相同合金。在各种非限制性实施方案中,形成冶金结合于内部锭芯的末端层的合金材料及形成冶金结合于该内部锭芯的外圆周层的合金材料是不同合金。在各种非限制性实施方案中,形成冶金结合于内部锭芯的末端层的合金材料及形成冶金结合于该内部锭芯的外圆周层的合金材料包含不同基底金属。

[0065] 在形成包含冶金结合于内部锭芯(及任选的,冶金结合于该内部锭芯的相对末端的一或两个末端层)的外层的锭后,可热处理合金锭。例如,在各种非限制性实施方案中,可使合金锭暴露于高温中以均匀化该内部锭芯的合金组成及微结构。高温可高于包含内部锭芯的合金的再结晶温度,但低于包含外层与内部锭芯的合金的熔点温度。在各种实施方案中,包含冶金结合于内部锭芯的外层(及任选的,冶金结合于该内部锭芯的相对末端的一或两个末端层)的锭于均匀化或其它热处理期间或之后不展现外层(和 / 或一或两个末端层)与内部锭芯的任何脱结合。

[0066] 本文所公开的各种非限制性实施方案也涉及锭加工方法及热加工工艺,其特征为降低热加工操作期间合金锭的表面破裂的发生率。在各种非限制性实施方案中,所述方法及工艺可包括形成具有冶金结合于内部锭芯的外层的合金锭。外层可包含比可包含内部锭芯的合金更具延展性的合金。外层可降低在施力于合金锭期间该合金锭的表面破裂的发生率。在各种非限制性实施方案中,通过对合金锭施加力可热加工合金锭。可将力施加于合金锭的外层。所施加的力可使合金锭变形。

[0067] 在各种非限制性实施方案中,一种热加工操作可包括锻造操作和 / 或挤压操作。例如,可墩锻和 / 或拉拔锻造包括冶金结合于内部锭芯的外层的合金锭。

[0068] 镦锻及拉拔锻造操作可包含镦锻操作的一或多个次序及拉拔锻造操作的一或多个次序。在镦锻操作期间, 锭的末端表面可与施力于锭(压缩锭的长度及增加锭的横截面)的锻模接触。在拉拔操作期间, 侧面(例如, 圆柱形锭的圆周表面)可与施力于锭(压缩锭的横截面及增加锭的长度)的锻模接触。

[0069] 图 5A 及 5C 图示拉拔锻造操作。锻模 280/280' 施力于锭 220/220'。通常垂直于锭 220/220' 的长轴 201/201' (如箭头 285/285' 所示) 施力。锻模 280/280' 通常沿着锭 220/220' 的全长, 通常通过平行于锭 220/220' 的长轴 201/201' (如箭头 287/287' 所示) 移动而施力于锭 220/220'。图 5A 显示无外层 220。锭 220 的圆周表面与锻模 280 接触(图 5A)。图 6C 显示锭 220', 其具有冶金结合于内部锭芯 223' 的外层 222。锭 220' 的外层 222 与锻模 280' 接触(图 5C)。

[0070] 图 5B 及 5D 分别图示如于图 5A 与 5C 中所述的拉拔锻造后锭 220 与 220' 的模具接触表面。如图 5B 所示, 锭 220 的模具接触表面 290 展现表面破裂。如图 5D 所示, 包括冶金结合于内部锭芯 223 的外层 222 的锭 220' 的模具接触表面 290' 不展现表面破裂。相对于另外缺少此外层的相同锻造合金锭, 外层 222 降低锻造合金锭中表面破裂的发生率。

[0071] 图 6A 及 6C 图示镦锻操作。锻模 380/380' 施力于锭 320/320' 的相对末端。如箭头 385/385' 所示, 通常平行于锭 320/320' 的长轴 301/301' 施力。图 6A 显示无外层 320。锭 320 的末端与锻模 380 接触(图 6A)。图 6C 显示包括冶金结合于内部锭芯 323 的外层 322 的锭 320'。外层 322 沿着内部锭芯 323 的圆周表面冶金结合于通常为圆柱形的内部锭芯 323。外层 322 也冶金结合于内部锭芯 323 的相对末端。外层 322 与锻模 380' 接触(图 6C)。

[0072] 图 6B 及 6D 分别图示如于图 6A 与 6C 中所述的镦锻锻造后锭 320 与 320' 中的每一个的模具接触表面。如图 6B 所示, 锭 320 的模具接触表面 390 展现表面破裂。如图 6D 所示, 包括冶金结合于内部锭芯 323 的外层 322 的锭 320' 的模具接触表面 390' 不展现表面破裂。相对于另外缺少此外层的相同锻造合金锭, 外层 322 降低锻造合金锭中表面破裂的发生率。

[0073] 在各种非限制性实施方案中, 具有冶金结合于内部锭芯的外层的合金锭可经受一或多个镦锻及拉拔锻造操作。例如, 在三重镦锻及拉拔锻造操作中, 先镦锻, 然后拉拔锻造锭。对于总共连续进行三次镦锻及拉拔锻造操作, 镦锻及拉拔次序可再重复两次。锭的一或多个模具接触表面可具有冶金结合于内部锭芯的外层。

[0074] 在各种非限制性实施方案中, 具有冶金结合于内部锭芯的外层的锭可经受一或多个挤压操作。例如, 在挤压操作中, 圆柱形锭可经圆柱形模具施力, 由此减小锭的直径及增加锭的长度。锭的一或多个模具接触表面可具有冶金结合于内部锭芯的外层。

[0075] 在各种非限制性实施方案中, 本文所述方法及工艺用于由包含冶金结合于内部锭芯的外层的锭制造锻造坯段。将锭的锻造转化或挤压转化为坯段或其它加工制品相较于锻造或挤压转化前的制品可使制品产生更精细的颗粒结构。由于外层可降低锻造和/或挤压操作期间锭的表面破裂的发生率, 故本文所述的方法及工艺可提高由合金锭产生锻造或挤压产品(诸如(例如)坯段)的产量。例如, 包含冶金结合于相对延展性较小的合金内部锭芯的相对延展性较高的合金外层的制品可比另外缺少相对延展性较高的合金外层的相同制品更轻易忍受加工模具所引起的应变。冶金结合于内部锭芯的外层也可更轻易忍受热

加工期间周围空气与锭之间和 / 或加工模具与锭之间的温差。如此,在加工对象期间,外层可展现零或微小表面破裂,同时可在加工期间可于下层内部锭芯中防止或减少表面开始破裂。

[0076] 在各种非限制性实施方案中,热加工后,可自热加工期间由锭形成的产品中移除至少一部分外层。例如,研磨、剥离和 / 或其它车削操作可用于移除外层的至少一部分。在各种非限制性实施方案中,通过剥离(车削车床加工)和 / 或研磨坯段和 / 或利用其它适宜技术自坯段(由加工锭所形成)移除至少一部分外层。

[0077] 在各种非限制性实施方案中,可热加工具有外层的锭以形成可用于制造各种制品的产品。例如,本文所述工艺可用于形成镍基、铁基、镍-铁基或钴基合金或超合金坯段。由热加工锭所形成的坯段或其它产品可用于制造制品,包括(但不限于)涡轮组件,诸如(例如)涡轮发动机的圆盘及环状物及各种地基涡轮。由根据本文所述的各种非限制性实施方案加工的锭所制造的其它对象可包括(但不限于)阀、发动机组件、轴及紧固件。

[0078] 以下说明性及非限制性实施例意欲进一步描述各种非限制性实施方案而不限制实施方案的范围。本领域普通技术人员将了解实施例的变体可在如通过权利要求单独界定的本发明范围内。除非另作说明,所有分数及百分比均以重量计。

实施例

[0079] 实施例 1

[0080] 形成包含冶金结合于内部锭芯的外层的圆柱形锭。形成包含合金 625 镍基合金(UNS06625)的圆柱形合金衬垫。合金 625 具有如表 1 中所提供的标称化学规格。

[0081]

化学	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Co	Fe	Mo	Ti	Al	Nb + Ta
% w/w, 最小	-	-	-	-	-	20.0	Bal.	-	-	8.0	-	-	3.15
% w/w, 最大	0.10	0.50	0.50	0.015	0.015	23.0	-	1.0	5.0	10.0	0.40	0.40	4.15

[0082] 表 1

[0083] 合金 625 管的 6 英寸截面(5.9375 英寸 OD×4.5945 英寸 ID)用于形成合金衬垫。将 6 英寸截面机器加工成 5.625 英寸 OD 以形成约 0.50-0.52 英寸的壁厚度。合金衬垫的重量为约 14.75lbs。

[0084] 合金衬垫置于铜 VAR 坩埚内。坩埚及合金衬垫套组置于 VAR 设备内并固定于坩埚底板。合金 718 镍基合金电极也置于 VAR 设备内并固定于撞锤。合金 718 具有如表 2 中所提供的标称化学规格。

[0085]

化学	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Co	Fe	Mo	Ti	Al	B	Nb + Ta
% w/w, 最小	-	-	-	-	-	17.0	50.0	-	Bal.	2.8	0.65	0.20	-	5.0
% w/w, 最大	0.08	0.35	0.35	0.015	0.015	21.0	55.0	1.0	-	3.3	115	0.80	0.006	5.5

[0086] 表 2

[0087] 合金 718 电极在 3.5 千安培及 25 伏特下真空电弧重熔。电弧最初在约 2 千安培下击出,然后将电弧电流快速升至 3.5 千安培。在约 7 分钟的熔融时间内,使 30lbs 的合金 718 电极熔融成合金 625 衬垫(平均熔融速率为 4.3lbs/min)。

[0088] 参照图 7,所得锭 400 包含冶金结合于内部锭芯 403 的外层 402。介于外层 402 与内部锭芯 403 间的接口 405 包含冶金结合。同轴配置内部锭芯 403 及外层 402。图 7 显示用氯化铁/Canada 的蚀刻剂蚀刻后锭的内部纵向截面。如图 7 的照片所示,在合金衬垫(合金 625)与经熔融的电极合金(合金 718)之间获得强烈及均匀的冶金结合,由此形成具有

冶金结合于合金 718 的内部铤芯的合金 625 的外层的铤。

[0089] **实施例 2**

[0090] 利用光学显微学使根据实施例 1 形成的铤的微结构成像。图 8A 是铤的合金 625 的外层的光学显微照片。图 8B 是恰好在介于外层与内部铤芯间的接口内的铤的合金 718 的内部铤芯的光学显微照片。图 8C 是在内部铤芯内的中间半径位置处合金 718 的铤内部铤芯的光学显微照片。图 8D 是介于铤外层与内部铤芯之间的接口的光学显微照片。如图 8D 所示,在铤的外层与内部铤芯之间形成强烈及均匀的冶金结合。

[0091] **实施例 3**

[0092] 利用扫描电子显微术 / 能量分散光谱学 (SEM/EDS) 定量分析根据实施例 1 所形成的铤的化学。图 9 是介于合金 625 的铤外层与合金 718 的铤内部铤芯之间的接口的 SEM 显微照片。如图 9 所示,在铤的外层与内部铤芯间形成强烈及均匀的冶金结合。

[0093] 表 3 中呈现利用 SEM/EDS 所确定的合金 625 的铤外层、合金 718 的内部铤芯及介于外层与内部铤芯之间的冶金结合接口区域的化学组成。外层与内部铤芯的 SEM/EDS 测量可分别自接口区域向外和向内取数微米。

[0094]

元素	合金 625 的外层 (% w/w)	接口区域 (% w/w)	合金 718 的内部 铤芯 (% w/w)
Al	0.18	0.24	0.42
Si	0.00	0.04	0.10
Ti	0.40	0.25	0.84
Cr	21.59	21.92	19.21
Fe	3.06	3.60	15.99
Ni	63.35	62.98	55.54
Nb	3.28	3.30	4.26
Mo	8.15	7.67	3.64
总计	100.01	100.00	100.00

[0095] **表 3**

[0096] 合金 625 的外层的化学组成在所有组成元素的合金级别的规格内 (表 1)。合金 718 的内部铤芯的化学组成在除镍、铌及钼外的所有组成元素的合金级别的规格内 (表 2)。除相对缺乏钛及相对富含铬外,接口区域的化学组成通常在合金 625 外层的化学组成与合金 718 内部铤芯的组成的中间。

[0097] 利用 SEM/EDS 在接口区域朝内约 0.5 英寸及 1 英寸处再测量合金 718 的内部铤芯的化学组成二次。结果示于表 4 中。

[0098]

元素	初始测量 (表 3) (% w/w)	距接口半英寸 处的测量 (% w/w)	距接口 1 英寸处 的测量 (% w/w)
Al	0.42	0.42	0.44
Si	0.10	0.14	0.15
Ti	0.84	1.18	1.03
Cr	19.21	18.53	18.40
Fe	15.99	17.65	17.08

[0099]

元素	初始测量 (表 3) (% w/w)	距接口半英寸 处的测量 (% w/w)	距接口 1 英寸处 的测量 (% w/w)
Ni	55.54	53.38	54.66
Nb	4.26	5.30	5.03
Mo	3.64	3.20	3.20
总计	100.00	99.80	99.99

[0100] 表 4

[0101] 除在距接口区域的 0.5 英寸处测量的钛含量外,合金 718 的内部锭芯所测得的化学组成在所有组成元素的合金级别的规格内。

[0102] 实施例 4

[0103] 利用 X-射线荧光 (XRF) 光谱测定法,燃烧及熔融技术及火花式光学发射光谱法 (OES) 定量分析根据实施例 1 所形成的锭的内部锭芯的化学。XRF 光谱测定法分析根据 ASTM E2465-06:通过 X-射线荧光光谱法分析 Ni 基合金的标准试验方法进行,其以引用的方式并入本文中。燃烧及熔融技术根据 ASTM E1019-08:通过各种燃烧及熔融技术测定钢、铁、镍及钴合金的碳、硫、氮气及氧的标准试验方法进行,其以引用的方式并入本文中。

[0104] 利用 XRF 光谱测定法、燃烧及熔融技术及火花式 OES 也可定量分析合金 718 电极的化学。所测的化学组成示于表 5 中。

[0105]

元素	电极 (% w/w)	内部锭芯 (% w/w)	差值 (% w/w)	相对于电极的 差值百分比
Al	54.010	53.774	-0.236	-0.4
Si	18.222	17.432	-0.790	-4.3
Ti	18.029	17.960	-0.069	-0.4
Cr	2.918	3.083	0.165	5.7
Fe	0.034	0.033	-0.001	-2.9
Ni	0.179	0.175	-0.004	-2.2
Nb	0.065	0.071	0.006	9.2
Mo	5.164	5.263	0.099	1.9
Cu	0.505	0.480	-0.025	-5.0
Co	0.079	0.088	0.009	11.4
Mn	1.001	0.989	-0.012	-1.2
C	0.026	0.024	-0.002	-7.7
总计	100.232	99.372	---	---

[0106] 表 5

[0107] 合金 718 的内部锭芯及初始合金 718 电极所测的化学组成在所有组成元素的合金级别的规格内。此外,于合金电极重熔于合金衬垫中以形成包含冶金结合于内部锭芯的外层的锭后,未观察到合金 718 材料的整体化学有明显变化。此证明电极化学极微或无因合金衬垫材料而渗透/稀释。因此,可轻易移除外层以形成规格内的合金 718 锭。或者,可热加工该锭,例如向下锻造以形成坯段及可轻易移除外层以形成展现较低表面破裂发生率的规格内的经锻造合金 718 坯段。

[0108] 已参照各种例示性、说明性及非限制性实施方案书写本发明。然而,本领域普通技术人员应了解在不脱离如通过权利要求单独界定的本发明范围下可作出任何所公开的实施方案(或其部分)的各种替代、修饰或组合。因此,应考虑及了解本发明包含本文未明确

阐明的额外实施方案。此等实施方案可例如通过组合、修饰或重组本文所述的实施方案的任何所公开的步骤、成份、组成要素、组份、元素、特征、方面、特性、限制等而获得。因此，本发明不受各种例示性、说明性及非限制性实施方案的描述所限制，但仅受权利要求所限制。如此，申请人保有在起诉增加如本文所述各种不同的特征期间修改权利要求的权利。

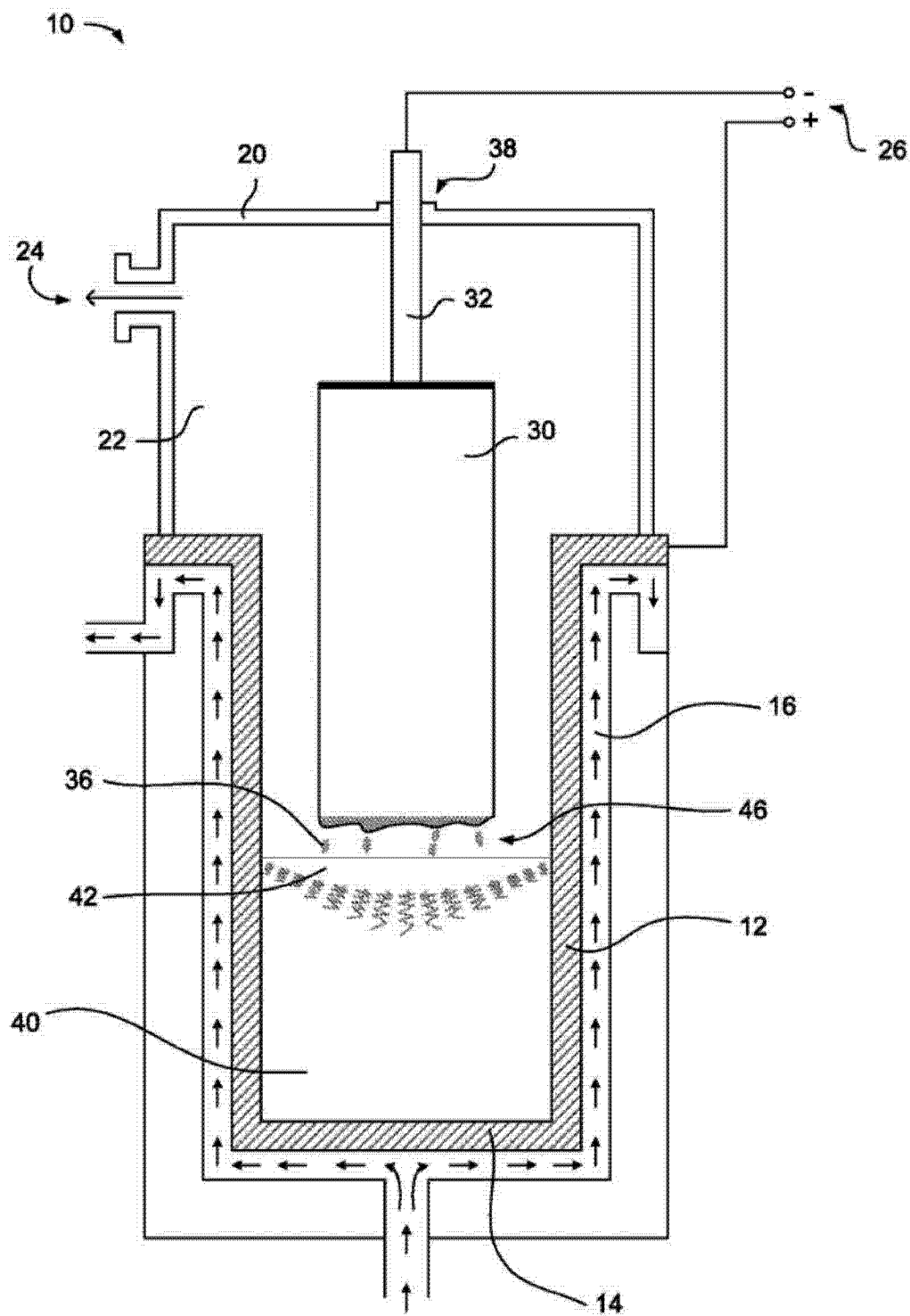


图 1

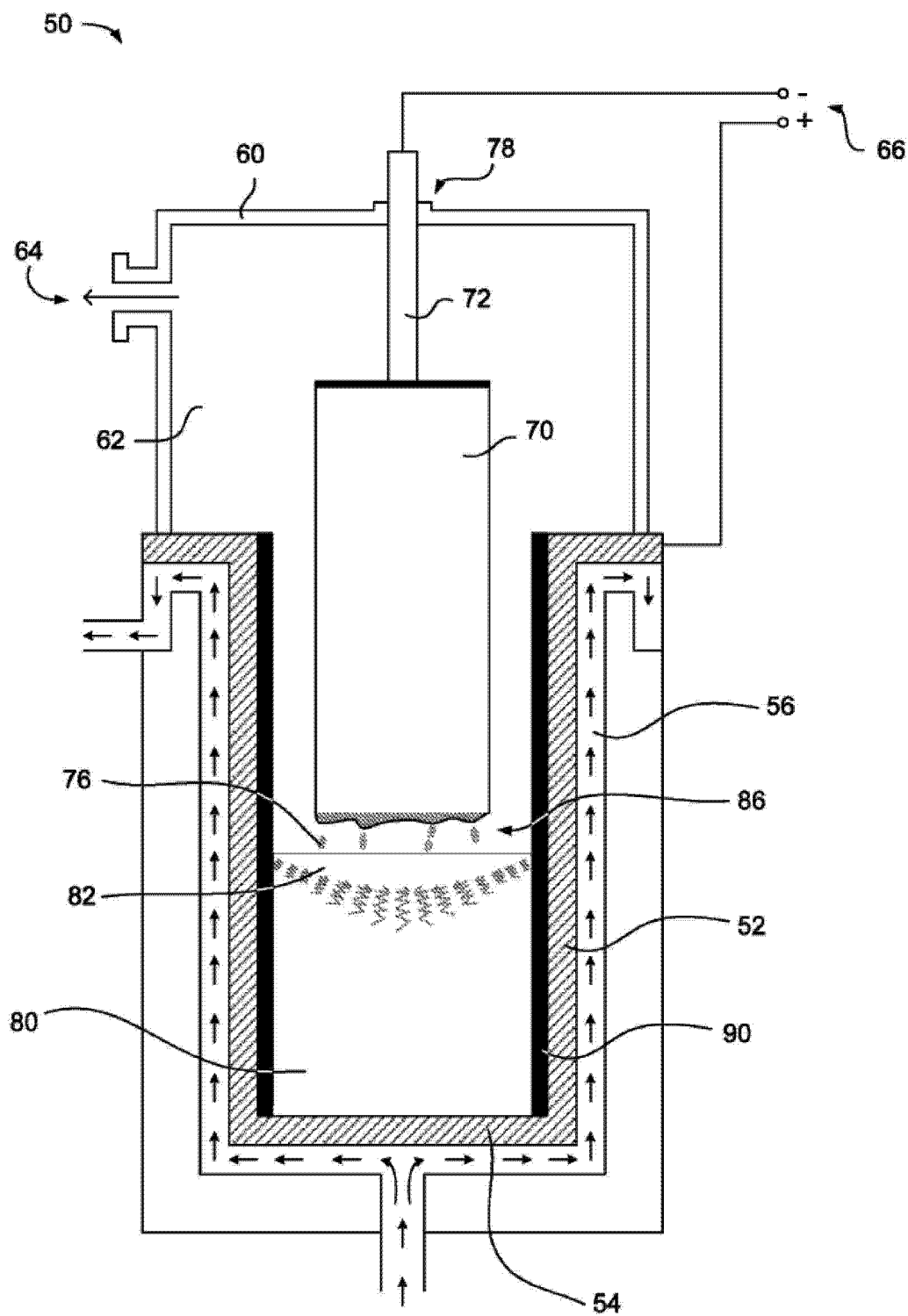


图 2

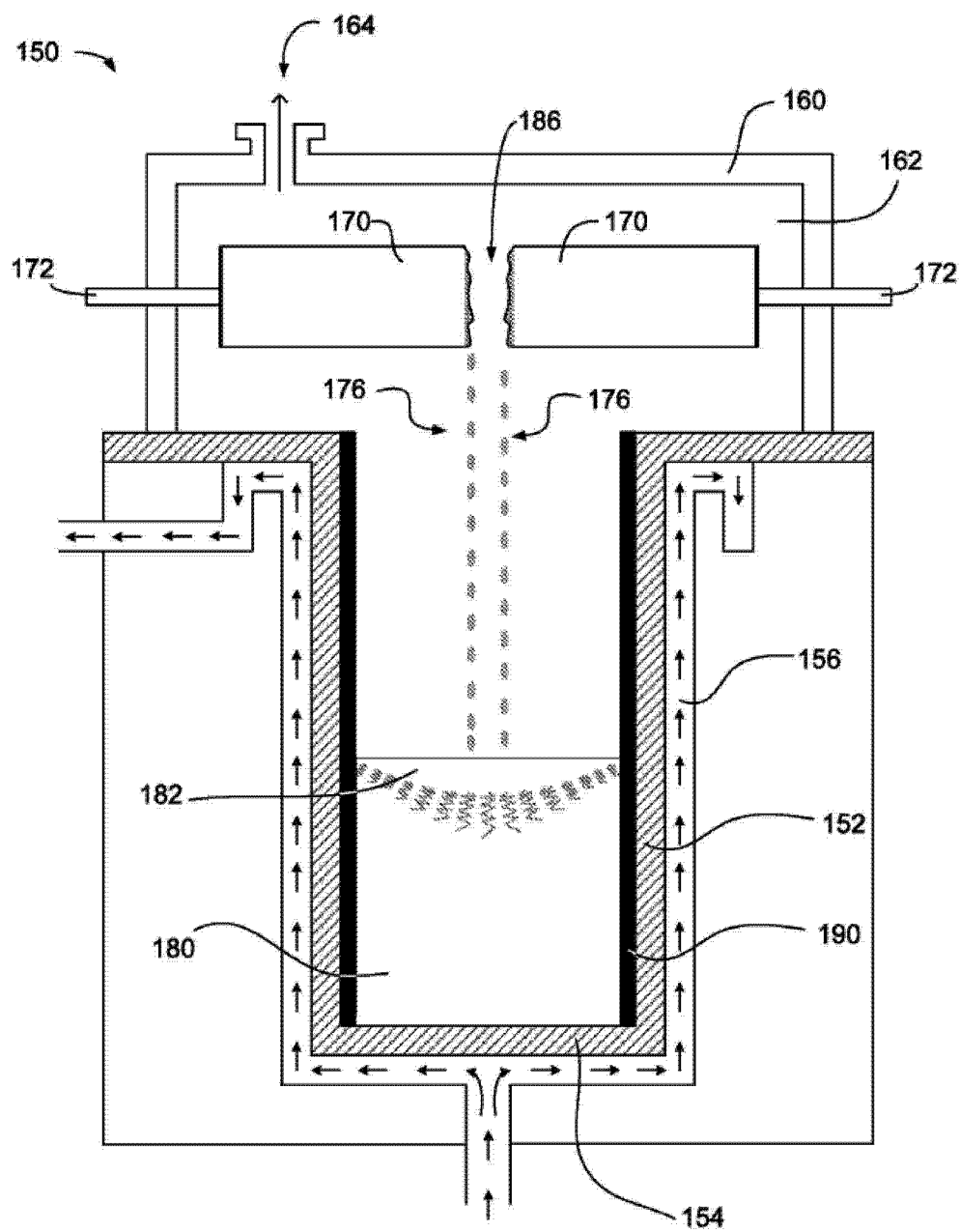


图 3

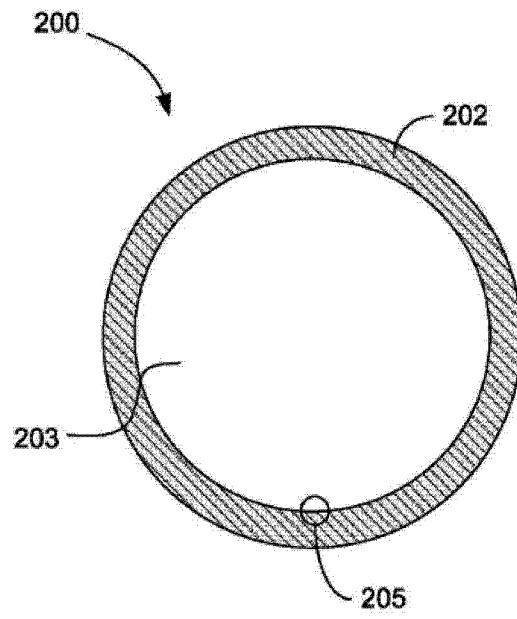


图 4A

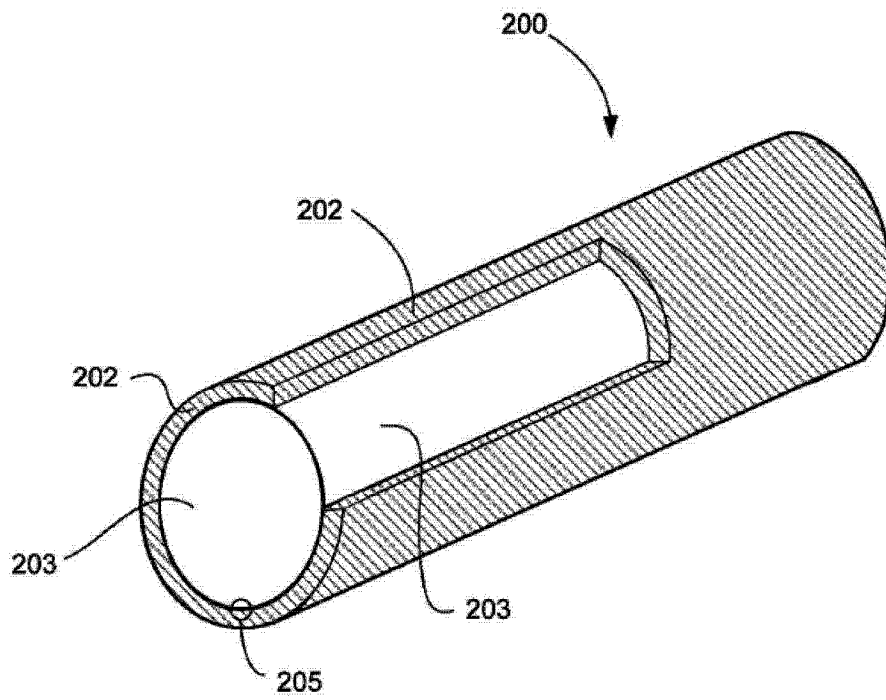


图 4B

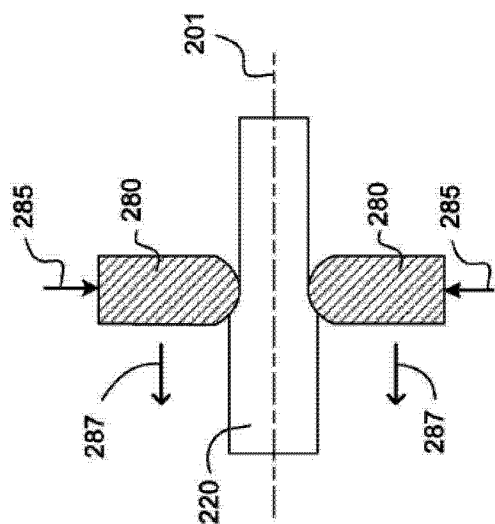


图 5A

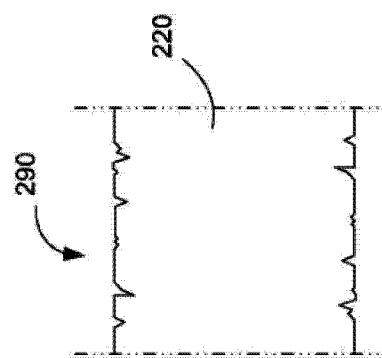


图 5B

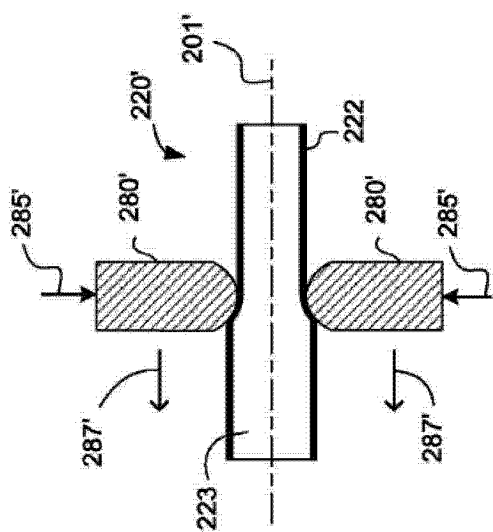


图 5C

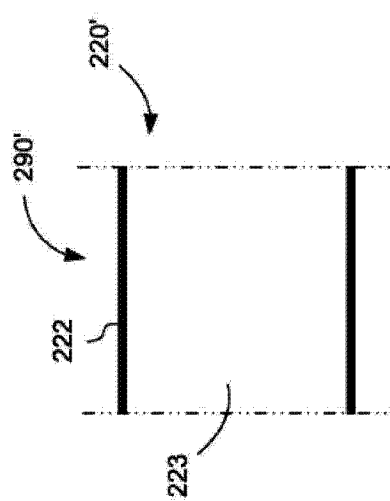


图 5D

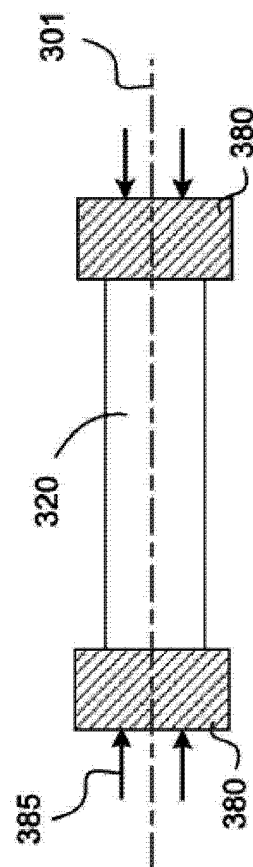


图 6A

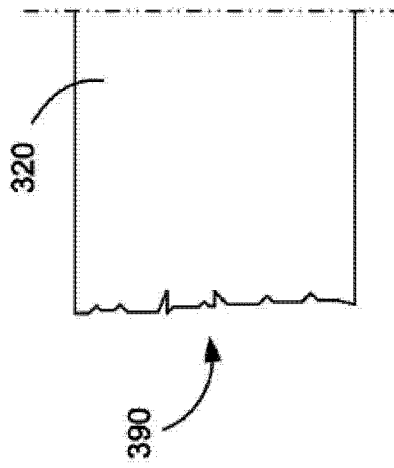


图 6B

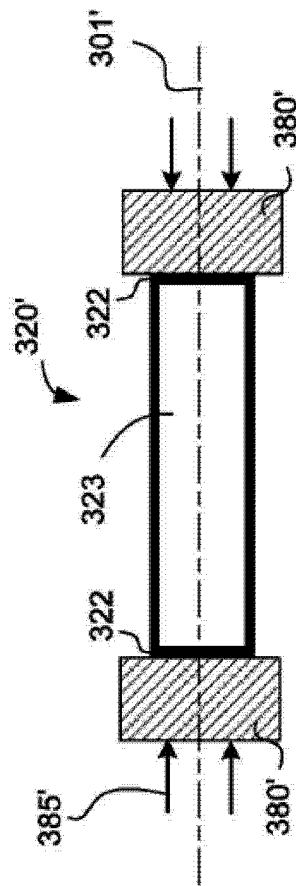


图 6C

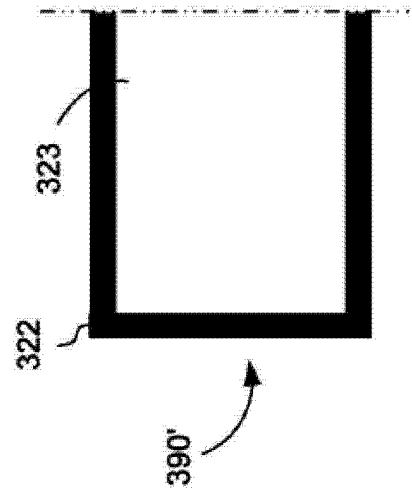


图 6D

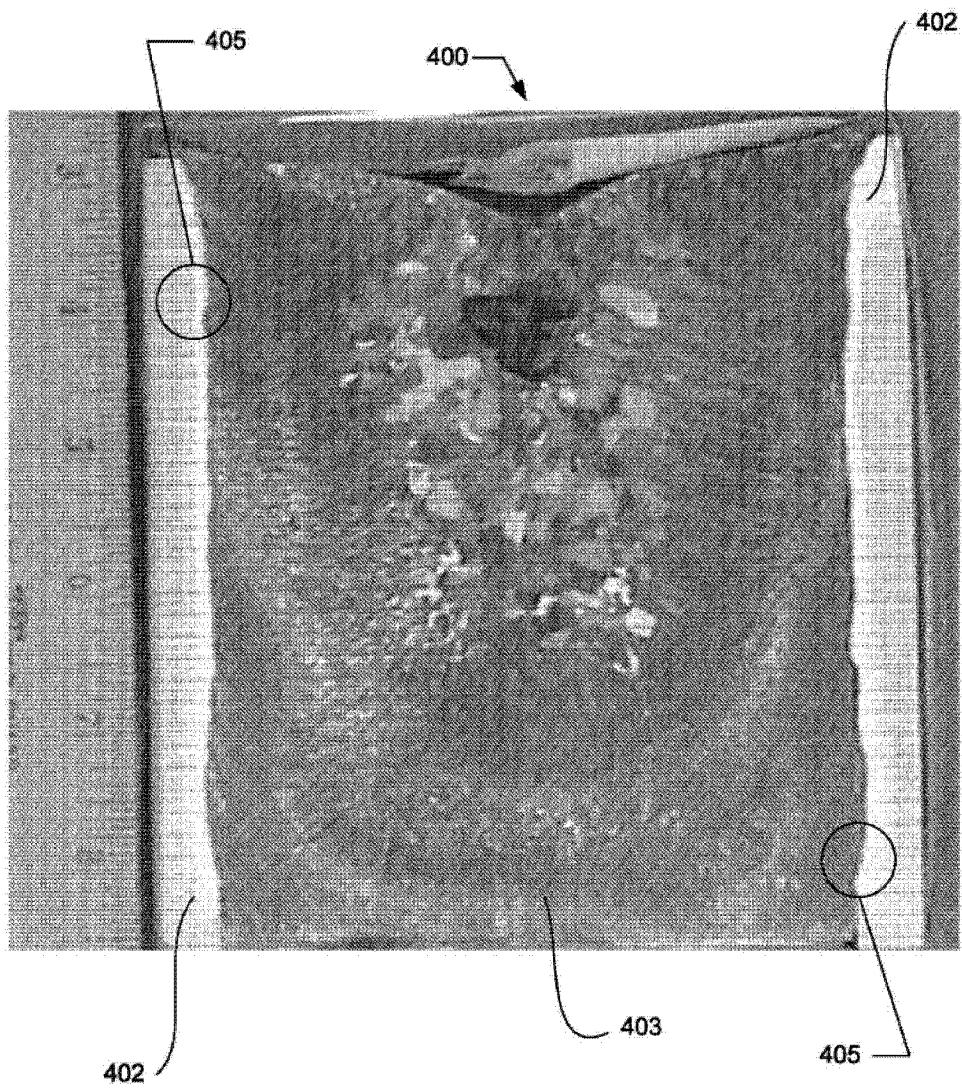


图 7

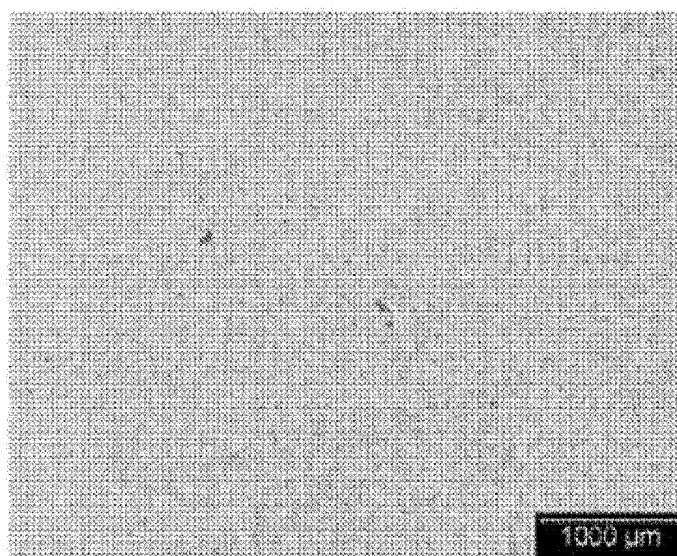


图 8A

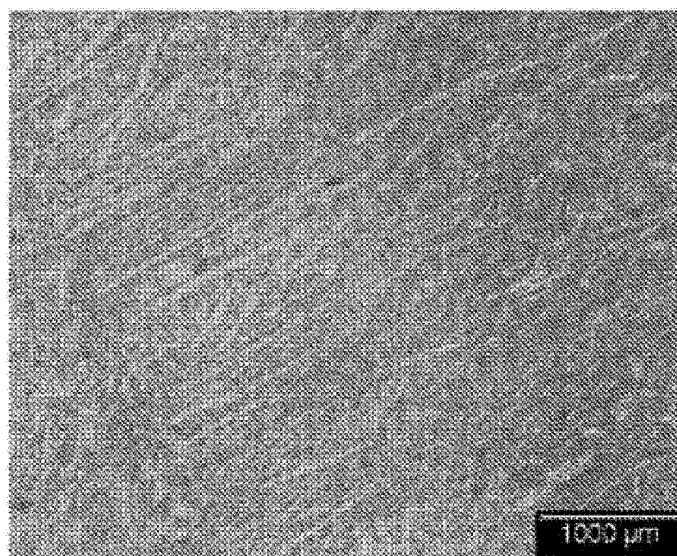


图 8B

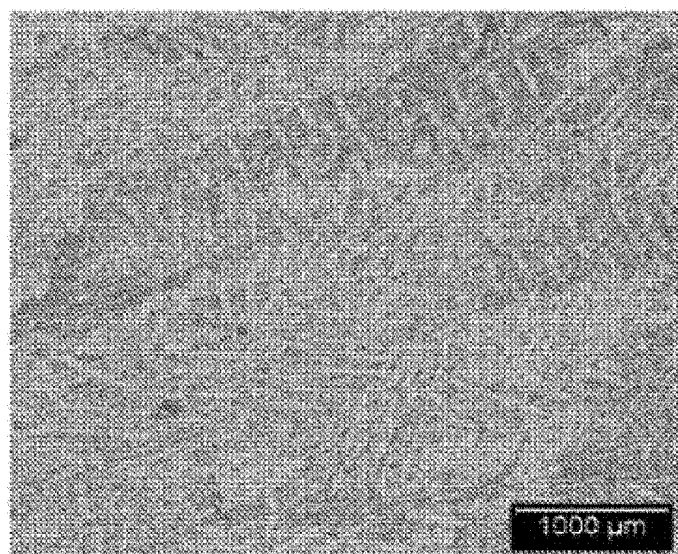


图 8C

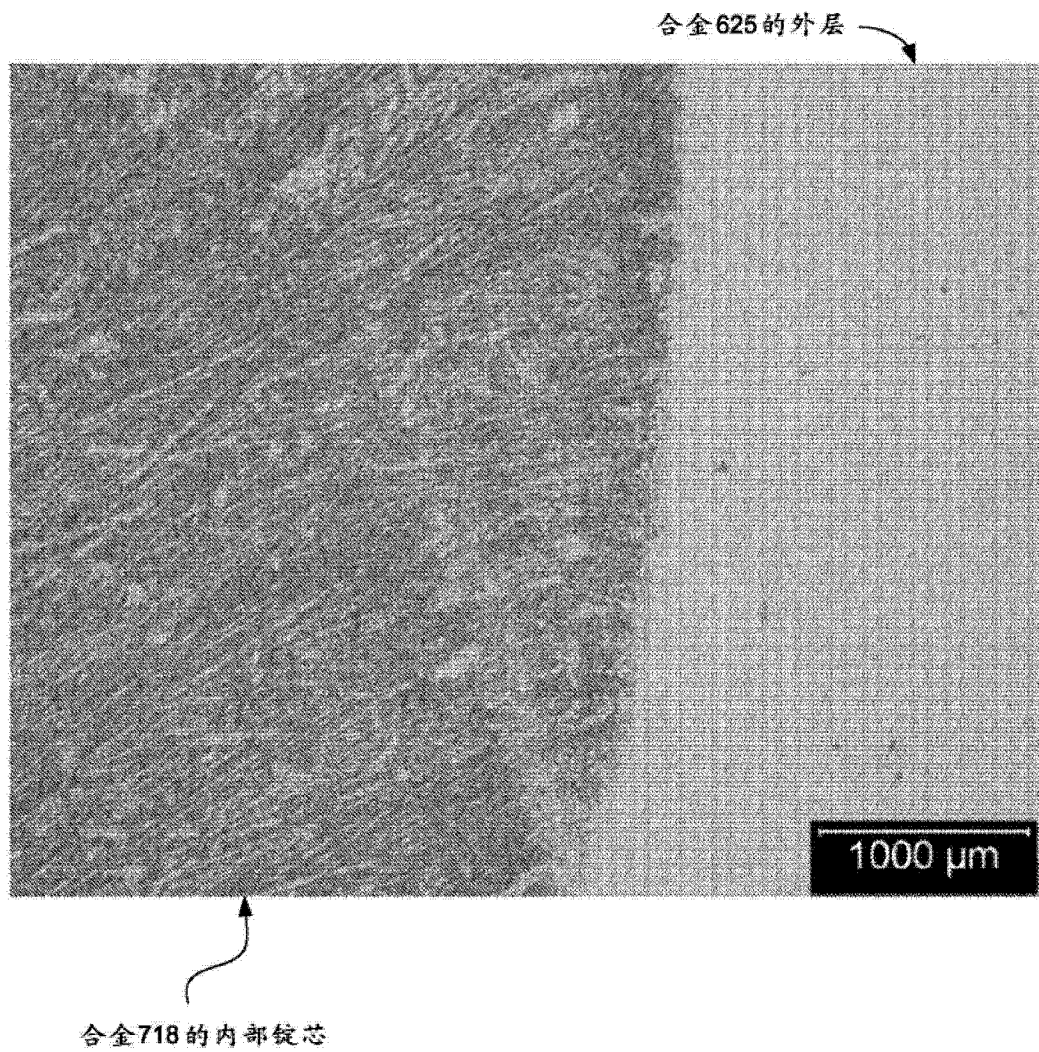


图 8D

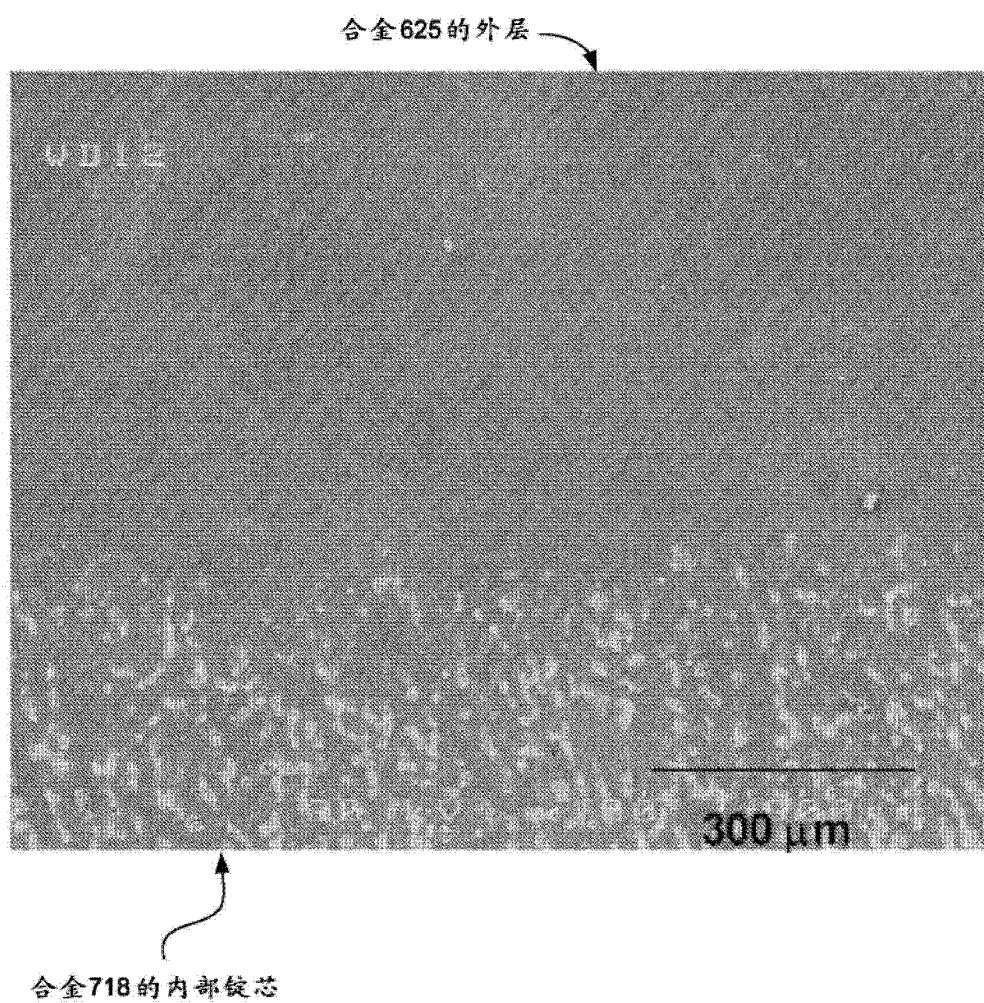


图 9