



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102134689 B

(45) 授权公告日 2016. 02. 17

(21) 申请号 201010609810. 9

(22) 申请日 2010. 12. 14

(30) 优先权数据

12/636976 2009. 12. 14 US

(73) 专利权人 通用电气公司

地址 美国纽约州

(72) 发明人 R·迪多米奇奥 M·J·阿林格

R·J·斯托尼特施 S·V·坦布

(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司
72001

代理人 李进 林毅斌

(51) Int. Cl.

C22C 38/58(2006. 01)

C22C 38/50(2006. 01)

B82Y 30/00(2011. 01)

B22F 3/04(2006. 01)

B22F 9/08(2006. 01)

F01D 5/28(2006. 01)

F01D 9/02(2006. 01)

(56) 对比文件

US 4075010 A, 1978. 02. 21,

CN 101148738 A, 2008. 03. 26,

US 2003/0116239 A1, 2003. 06. 26,

Alinger MJ. et al. Positron
annihilation characterization of
nanostructured ferritic alloys. 《Materials
Science and Engineering A》. 2009, 第 518 卷

Alinger MJ. et al. Positron
annihilation characterization of
nanostructured ferritic alloys. 《Materials
Science and Engineering A》. 2009, 第 518 卷

审查员 吴静

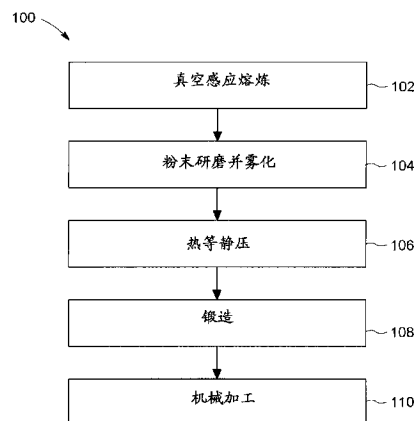
权利要求书1页 说明书6页 附图1页

(54) 发明名称

处理纳米结构铁素体合金的方法和由其制造的制品

(57) 摘要

本发明提供一种包含纳米结构铁素体合金的成形制品。最好该制品不通过挤出形成, 因此节省成本。本发明还提供形成该制品的方法, 如此制造的制品用作涡轮机部件, 特别是燃气涡轮机或蒸汽涡轮机的大的、热区段部件显示足够的连续循环疲劳裂纹扩展抗性和停留时间疲劳裂纹扩展抗性。在其他实施方案中, 提供包含 NFA 的涡轮机部件, 在一些此类实施方案中, 可挤出涡轮机部件。



1. 一种包含纳米结构铁素体合金的成形制品,其中所述制品没有使用挤出而形成,且其中所述纳米结构铁素体合金包含 5%重量至 30%重量铬、0.1%重量至 2%重量钛,余量为铁和偶然的杂质;

且纳米体包含 Ti-O 和选自 Zr、Hf、Mo、W、Mn、Si、Nb、Ni 或 Ta 中的至少一种元素。

2. 权利要求 1 的制品,其中所述纳米结构铁素体合金还包含

0%重量至 5%重量钼、0%重量至 5%重量钨、0%重量至 5%重量锰、0%重量至 5%重量硅、0%重量至 2%重量铌、0%重量至 8%重量镍、0%重量至 2%重量钽、0%重量至 0.5%重量碳和 0%重量至 0.5%重量氮。

3. 权利要求 2 的制品,其中所述纳米结构铁素体合金包含 9%重量至 14%重量铬、0.1%重量至 0.5%重量钛、0%重量至 3%重量钼、0%重量至 3%重量钨、0%重量至 1%重量锰、0%重量至 1%重量硅、0%重量至 0.5%重量铌、0%重量至 2%重量镍、0%重量至 0.5%重量钽、0%重量至 0.1%重量碳和 0%重量至 0.1%重量氮,余量为铁和偶然的杂质;和其中所述纳米体以至少 10^{22}m^{-3} 数密度存在。

4. 一种涡轮机部件,所述涡轮机部件包含权利要求 1 的纳米结构铁素体合金。

5. 权利要求 4 的涡轮机部件,所述涡轮机部件可用于能量应用。

6. 权利要求 5 的涡轮机部件,所述涡轮机部件包括轮或隔片。

7. 权利要求 4 的涡轮机部件,所述涡轮机部件包括可用于航空航天应用的盘。

8. 一种形成包含纳米结构铁素体合金的涡轮机部件的方法,所述方法包括以下步骤:

以真空感应熔炼使合金熔融,从而形成所述合金的熔体,其中所述合金是马氏体、奥氏体、双相或铁素体钢中之任何;

使所述合金熔体雾化,以形成所述合金的雾化粉末;

将所述合金的雾化的粉末在氧化物存在下研磨,直到氧化物溶入所述合金;和

在惰性环境下将粉末热等静压,以形成热等静压的纳米结构铁素体合金预型件;且

锻造所述纳米结构铁素体合金预型件为涡轮机部件,其中在没有挤出的条件下实施所述步骤;

其中热等静压在 900°C - 1200°C 的温度范围在至少 1 小时,在至少 20ksi 的压力进行;且所述惰性环境通过抽空获得,且

其中锻造在 1000°C - 1200°C 的温度进行,以减少厚度至少 30%。

处理纳米结构铁素体合金的方法和由其制造的制品

技术领域

[0001] 本公开涉及纳米结构铁素体合金 (NFA)，更特别是，涉及处理所述合金，以便含 NFA 且如此处理的制品适用于挑战环境的方法。

背景技术

[0002] 燃气轮机在极端环境工作，这些环境使轮机部件（尤其是轮机热区段中的那些部件）暴露于高工作温度和应力。为了使轮机部件经受这些条件，它们必需由能够经受这些苛刻条件的材料制造。由于在最高达 90% 的熔融温度保持强度，并且具有极佳的耐环境性能，超合金已用于这些高要求应用。特别是，镍基超合金已广泛在整个燃气轮机中使用，例如在轮机叶片、喷嘴、轮、隔片、盘、轴、叶盘和轮盖中应用。然而，用于改善燃气轮机性能的设计需要具有甚至更高温度能力的合金。

[0003] 为了达到所需的机械性能，在重型轮机部件中使用的镍基超合金需要特殊处理步骤。被称为铸锻 (C&W) 方法的该方法以三个熔融操作开始：真空感应熔炼 (VIM)、电渣重熔 (ESR) 和真空弧重熔 (VAR)。初始 VIM 操作使这些元素一起混合，形成目的合金；然而，存在显著杂质和大量化学分离。需要随后 ESR 和 VAR 步骤来产生化学纯的均匀锭。所得 VAR 锭的晶粒太粗糙，以致于不能得到必需的机械性质。结果，锭由双缩锻和拉伸操作断裂，导致镍基超合金结构重结晶和精炼。最后，锻造坯料，并机械加工成其最终所需形状。

[0004] 纳米结构铁素体合金 (NFA) 是一类显示异常高温性能的新出现合金，据认为，这种合金衍生自纳米大小的氧化物簇，这种氧化物簇在机械成合金步骤后热固结期间沉淀。这些氧化物簇出现在高温，在工作期间提供强、稳定的微观结构。与需要遵循 C&W 方法以得到所需性质的很多镍基超合金不同，NFA 通过不同处理途径制造。与 C&W 方法一样，合金化学通过 VIM 操作产生。然而，在初始熔融后，NFA 雾化，并收集为固体粉末颗粒。然后，这些粉末颗粒与氧化物添加剂混合，并在钢丸 (steel shot) 存在下研磨，直到氧化物添加剂溶于金属基质。ESR 和 VAR 步骤不需要。

[0005] 为了使任何材料最佳地用于例如重型轮机的大的热区段部件，也可能期望表现可接受的连续循环疲劳裂纹扩展速率和可接受的停留时间疲劳裂纹扩展速率两者。这种材料也可能期望用于较小的轮机部件，例如，用于喷气发动机的盘，这些可能具有不同组所需或需要特性。任何此类合金也期望与常规铸锻方法相比，能够用耗能和 / 或耗时较少的方法制造成所需的制品。

发明内容

[0006] 一方面，本发明提供一种包含纳米结构铁素体合金的成形制品，其中该制品不通过挤出形成。

[0007] 本发明还提供一种包含纳米结构铁素体合金的轮机部件。

[0008] 另一方面，本发明提供一种形成包含纳米结构铁素体合金的轮机部件的方法。此方法不包括挤出。

[0009] 还另一方面,本发明提供一种形成包含纳米结构铁素体合金的涡轮机部件的方法。所述方法包括,通过真空感应熔炼使纳米结构铁素体合金熔融,使纳米结构铁素体合金熔体雾化,将雾化的粉末过筛,在氧化物存在下研磨经雾化的粉末,直到氧化物溶入金属基质,并在惰性环境下将粉末装罐并热等静压。

附图说明

[0010] 通过阅读以下详述并参考附图,本发明的这些和其他特征、方面和优点将变得更好理解,其中在全部附图中相似的字符代表相似的元件,其中:

[0011] 图 1 为本文提供的方法的一个实施方案的示意图。

具体实施方式

[0012] 除非另外定义,本文所用的技术和科学术语均具有本发明所属领域的技术人员通常理解相同含义。本文所用术语“第一”、“第二”等不表示任何次序、量或重要性,而是用于区分一个元素与另一个元素。另外,术语“一”和“该”不表示量的限制,而是表示存在至少一个所述项目,并且除非另外说明,术语“前部”、“后部”、“底部”和/或“顶部”只是为了方便说明使用,不限于任何一个位置或空间取向。如果范围公开,则涉及相同部件(或组分)或性质的所有范围的端点为包括性的并且可以独立组合(例如,“最高达约 25%重量,或更特别是,约 5%重量至约 20%重量”范围包含端点和“约 5%重量至约 25%重量”范围的所有中间值等)。与量相关使用的修饰词“约”包含所述值在内,并且具有由上下文指定的含义(例如,包括与具体量测量相关的误差度)。

[0013] 本发明提供包含纳米结构铁素体合金的成形制品,其中该制品不通过挤出形成。现在已意外地发现,所成形的制品可由此类合金制造而不用挤出步骤,这是有利的,因为挤出限制最终部件几何尺寸。即,挤出步骤需要减小横截面面积,这使部件直径限于排除制品用于很多应用的尺寸。

[0014] 在其他实施方案中,本发明包括可根据需要通过挤出形成的较小部件。例如,用于航空航天应用的部件可有利地由 NFA 形成,在此情况下,NFA 可提供具有此类应用期望的性质,并且用常规镍基合金不能得到的部件。

[0015] 无论是否由挤出、热等静压、热等静压锻造或轧辊压制形成,成形的制品均包含至少一种纳米结构铁素体合金(NFA)。NFA 为一种由不锈钢基质组成的新出现的合金种类,该不锈钢基质为通过很高密度增强的分散体,即,至少约 10^{18}m^3 ,或至少约 10^{20}m^3 ,或甚至至少约 10^{22}m^3 的 nm 级,即约 1nm 至约 100nm,或约 1nm 至约 50nm,或约 1nm 至约 10nm 的纳米体(nanofeature)(NF),该纳米体包含 Ti-O 和至少一种来自用于制备 NFA 或合金基质的氧化物的其他元素。例如,可用氧化钇、氧化铝、氧化锆、氧化钪制备 NFA,在此情况下,纳米体可包含钇(Y)、铝(Al)、锆(Z)、钪(Hf)或其组合。过渡金属,如来自合金基质的 Fe、Cr、Mo、W、Mn、Si、Nb、Al、Ni 或 Ta,也可在纳米体产生中沉淀。

[0016] 相比之下,常规氧化物分散体增强的(ODS)合金一般包含精炼但较大的平衡氧化物相,并且氧化物添加剂在整个粉末冶金过程中稳定,即,如果氧化钇加到基质合金,则氧化钇就会在成合金步骤后存在,并且没有显著上述纳米体(NF)的形成。在 NFA 中,大部分(如果不是基本上全部)加入的氧化物在粉末研磨期间溶入合金基质,并且在压紧过程中

粉末的温度升高时在前述纳米体形成中沉淀。如上所述, NFA 中的新氧化物可包含基础合金 (base alloy) 中存在的过渡金属和初始氧化物添加的金属元素。

[0017] 虽然 NFA 不锈钢基质最经常为铁素体不锈钢, 但马氏体、双相和奥氏体不锈钢也是潜在的基质合金。改变钢基质相可允许改善对耐环境性能和材料延性的控制。

[0018] 可使任何 NFA 形成所公开的制品。理想的是, NFA 可包含铬。铬对保证耐腐蚀性可能很重要, 并且可因此以至少约 5% 重量, 或至少约 9% 重量的量包含于 NFA 中。可包含最高达约 30% 重量或最高达约 20% 重量或最高达约 14% 重量的量。铬和铁两者 (NFA 的基质) 有利地可容易得到, 并且成本相对较低, 特别是与在一些应用中 NFA 可代替的镍基超合金相比。

[0019] NFA 也可能期望包含一定量的钛。钛可在沉淀的氧化物生成中沉淀, 因此, 期望在 NFA 中包含约 0.1% 重量至约 2% 重量或约 0.1% 重量至约 1% 重量或约 0.1% 重量至约 0.5% 重量的钛。

[0020] NFA 还期望包含至少约 10^{18}m^{-3} 或至少约 10^{20}m^{-3} 或甚至至少约 10^{22}m^{-3} 数密度的上述纳米体。纳米体的组成将取决于制备 NFA 和 / 或合金基质使用的氧化物。一般纳米体包含 Ti-O 和 Y、Al、Zr、Hf、Fe、Cr、Mo、W、Mn、Si、Nb、Al、Ni 或 Ta 中的至少一种。

[0021] 适用于形成制品的一种示例性 NFA 可包含约 5% 重量至约 30% 重量铬、约 0.1% 重量至约 2% 重量钛、约 0% 重量至约 5% 重量钼、约 0% 重量至约 5% 重量钨、约 0% 重量至约 5% 重量锰、约 0% 重量至约 5% 重量硅、约 0% 重量至约 2% 重量铌、约 0% 重量至约 2% 重量铝、约 0% 重量至约 8% 重量镍、约 0% 重量至约 2% 重量钽、约 0% 重量至约 0.5% 重量碳和约 0% 重量至约 0.5% 重量氮, 余量为铁和偶然的杂质; 和至少约 10^{18}m^{-3} 数密度的纳米体, 所述纳米体包含 Ti-O 和来自制备 NFA 期间加入的氧化物或来自合金基质的至少一种元素。

[0022] 在其他实施方案中, NFA 可包含约 9% 重量至约 20% 重量铬、约 0.1% 重量至约 1% 重量钛、约 0% 重量至约 4% 重量钼、约 0% 重量至约 4% 重量钨、约 0% 重量至约 2.5% 重量锰、约 0% 重量至约 2.5% 重量硅、约 0% 重量至约 1% 重量铌、约 0% 重量至约 1% 重量铝、约 0% 重量至约 4% 重量镍、约 0% 重量至约 1% 重量钽、约 0% 重量至约 0.2% 重量碳和约 0% 重量至约 0.2% 重量氮, 余量为铁和偶然的杂质; 和至少约 10^{20}m^{-3} 数密度的纳米体, 所述纳米体包含 Ti-O 和来自制备 NFA 期间加入的氧化物或来自合金基质的至少一种元素。

[0023] 在还其他实施方案中, NFA 可包含约 9% 重量至约 14% 重量铬、约 0.1% 重量至约 0.5% 重量钛、约 0% 重量至约 3% 重量钼、约 0% 重量至约 3% 重量钨、约 0% 重量至约 1% 重量锰、约 0% 重量至约 1% 重量硅、约 0% 重量至约 0.5% 重量铌、约 0% 重量至约 0.5% 重量铝、约 0% 重量至约 2% 重量镍、约 0% 重量至约 0.5% 重量钽、约 0% 重量至约 0.1% 重量碳和约 0% 重量至约 0.1% 重量氮, 余量为铁和偶然的杂质; 其中 NFA 包含至少约 10^{22}m^{-3} 数密度的纳米体, 所述纳米体包含 Ti-O 和来自制备 NFA 期间加入的氧化物或来自合金基质的至少一种元素。

[0024] 成形的制品可以为期望具有由 NFA 所赋予的性质的任何制品。可发现特别得益于应用本文所述原理的制品的一个示例种类包括涡轮机部件, 特别是, 在使用期间经历高温的那些部件。

[0025] 用 γ' (gamma prime) 或 γ'' 相增强的镍基超合金常规用于这些应用。例如, 用

γ'' 相增强的重型涡轮机轮通常见到 1000° F 至 1100° F 范围的最大工作温度。然而,随着温度增加,高于 1100° F 时,很多 γ'' 相增强的镍基超合金的停留时间裂纹扩展抗性不符合重型涡轮机轮的设计要求。结果,只能由较高工作温度才能实现的效率增加和 CO₂ 减少由于镍基超合金材料性质限制不能达到。

[0026] 因此,在一些实施方案中,形成的制品可有利地包括重型燃气涡轮机或蒸汽涡轮机的大的、热区段部件。特别是,这类制品和轮和隔片一般超过 60 英寸或更大直径,并且不能通过挤出形成。

[0027] 在此类实施方案中,即,其中成形的制品包括由单一合金通过热等静压、热等静压锻造或轧辊压制制造的重型涡轮机轮,所用合金需要能够经受根据轮内位置不同的条件。当边缘在高于 1100° F 工作时,孔可在最高达 900° F 工作。在此温度,合金必须能够经受约 120ksi 的拉伸应力,重要的是同时所有位置也显示足够的疲劳裂纹扩展抗性。

[0028] 现在已意外地发现,NFA 可用于此类应用,并且可提供所需和 / 或需要的边缘和孔性质。更特别是,包含 NFA 的制品可显示通过 ASTM E647 测定,在 1000° F,45ksi*in^{0.5} 应力强度因子 (k) 小于约 1.20E⁻⁴ 英寸 / 循环,或甚至小于约 9.03E⁻⁵ 英寸 / 循环的连续循环疲劳裂纹扩展速率。并且,包含 NFA 的制品可显示通过 ASTM E1457 测定,在 1000° F,45ksi*in^{0.5} k 小于约 1.80E⁻³ 英寸 / 小时,或甚至小于约 1.35E⁻³ 英寸 / 小时的停留时间疲劳裂纹扩展速率。

[0029] 最好所述制品不通过常规的铸锻方法形成,并因此节省时间。在一些实施方案中,制品不通过包括挤出的方法形成,因此,最终部件尺寸没有特别限制。在其他实施方案中,如航空航天涡轮机应用中,其中需要可由 NFA 提供的性质的部件一般可小于重型涡轮机应用中使用的那些,最好可将部件挤出。

[0030] 在其中形成制品不用挤出的那些实施方案中,本文提供的制品可通过首先由真空感应熔炼 (VIM) 使 NFA 熔融来形成。真空感应熔炼使所有元素类物质一起熔融和混合,形成目的合金。为了如此进行,将目的元素加入真空感应熔炼炉并加热,直到混合物变熔融。如此进行所需的条件将取决于期望利用的元素,本领域的技术人员将很容易能够确定这一点。

[0031] 可使用底孔真空感应熔炼系统,以便熔融的金属下落通过惰性气体雾化器。雾化器可利用任何惰性气体,但最通常使用 Ar、N 或 He。在一些实施方案中,利用氩。此气体雾化器产生粉末颗粒,粉末颗粒在飞行中冷却,并且一旦完全为固体和 / 或冻结,就将它们收集。

[0032] 在仍然处于惰性气体覆盖下的同时,然后将经雾化的粉末过筛至最终粉末分级 (cut)。一般产生这种粉末分级是为了减小粒度分布,提高堆积密度,并去除任何大的杂质。将粉末转移到研磨容器,同时继续保持惰性气体覆盖。除了雾化粉末外,还将所需的氧化物和钢丸加到研磨容器。可利用任何量的任何氧化物,虽然一般以基于 NFA 总重量 1% 重量或更小的量使用氧化钇、氧化铝、氧化锆、氧化钪。加入一般 5mm 的钢丸,使得丸:粉末比率为约 10:1 质量。然后研磨粉末,直到所需氧化物溶入金属基质。研磨时间可根据选择的氧化物变化,并且一般可大于 10 小时。

[0033] 在惰性气体覆盖下将粉末从研磨机卸料,并移除钢丸。一旦钢丸移除,就将粉末装入容器 (或罐) 进行热等静压 (HIP)。然后在室温将罐抽空,直至达到可接受的漏回率

(leak back rate)。然后将罐加热到例如约 550F, 并再次抽空, 例如直至在此温度达到可接受的漏回率。

[0034] 一旦抽空并且密封, 就通过热等静压使粉末固结。更特别是, 可将罐在基于期望固结 NFA 的适合条件 (这些条件一般包括至少约 20ksi 或甚至 30ksi 的压力), 在至少约 900℃或 1000℃或 1100℃或更高温度热等静压至少约 1 小时或 2 小时或 3 小时或 4 小时或更长时间。在热等静压后, 预料纳米结构铁素体合金具有大于理论密度 95% 的密度。

[0035] 在一些实施方案中, 可将 HIP 重新加热到约 1000℃或 1100℃或 1200℃的温度, 然后转移到开放式模锻压机, 罐的高度可降低至少约 30%, 或至少约 40%, 或至少约 50%。将罐从锻压机移出并重新加热, 直至整个罐再一次在约 1000℃或 1100℃或 1200℃的温度。然后第二次将罐转移到开放式模锻压机, 并缩锻 (upset), 即, 罐的高度可降低至少约 30%, 或至少约 40%, 或至少约 50%。然后使锻造材料空气冷却。在锻造后, 纳米结构铁素体合金具有大于理论密度 98% 的密度。在一些实施方案中, 一旦冷却, 就可由锻件机械加工本发明制品, 以提供所需的制品。

[0036] 或者, 可通过轧辊压制形成制品。在此类实施方案中, 一旦在研磨后去除钢球, 并且如果需要将粉末过筛, 就可将粉末进料至辊压机, 在此将粉末压成片。然后可将金属片烧结成致密体。在一些实施方案中, 可使烧结片然后经过多次轧制和烧结操作。

[0037] 图 1 示意说明所提供方法的一个实施方案。更具体的讲, 方法 100 包括真空感应熔炼 NFA 的元素的第一步骤 102。将目的元素加入真空感应熔炼炉并加热, 直到混合物变熔融。可使用底孔真空感应熔炼系统, 以便熔融的金属下落通过惰性气体雾化器。

[0038] 在第二步骤 104, 使熔融的金属经过粉末雾化, 并研磨。雾化步骤产生粉末颗粒, 粉末颗粒在飞行中冷却, 并且一旦为固体就将它们收集。然后, 在步骤 106 将雾化的粉末过筛, 或者研磨 [更详细且更具体是关于粉末分级], 在氧化物存在下研磨经过筛的粉末, 直到氧化物溶入金属基质。

[0039] 然后, 在步骤 108 将粉末装入容器, 抽空, 然后通过热等静压来固结。在热等静压后, 预料纳米结构铁素体合金具有大于理论密度 95% 的密度。或者, 可如上所述用轧辊压制使粉末固结。

[0040] 然后, 任选在步骤 110 锻造所得固结坯料, 并在步骤 112 机械加工。在锻造后, 纳米结构铁素体合金可具有大于理论密度 98% 的密度。

[0041] 旨在为示例性而非限制性的以下实施例举例说明制造各种制品实施方案中的一些的组合物和方法, 所述制品含本文提供的 NFA 的一些实施方案。

[0042] 实施例 1

[0043] 向真空感应熔炼炉加入以下组合物: Fe-14Cr-0.4Ti-3W-0.5Mn-0.5Si (% 重量)。一旦合金熔融并且充分混合, 就通过氩气雾化。在仍然处于惰性气体覆盖下的同时, 将粉末过筛至 +325/-100 最终分级尺寸 (cut size), 并密封在容器中。将粉末转移到研磨容器, 同时继续保持惰性气体覆盖。除了雾化粉末外, 还将 0.25% 重量氧化钇和 5mm 钢丸加到研磨容器。加入钢丸, 使得丸: 粉末比率为 10 : 1 质量。然后研磨粉末约 12 小时, 或直到氧化钇已溶入金属基质。在惰性气体覆盖下将粉末从研磨机卸料, 并移除钢丸。一旦钢丸移除, 就将粉末装入容器 (或罐) 进行热等静压 (HIP)。然后在室温将罐抽空, 直至达到 15 微米 / 小时或更佳的漏回率。然后将罐加热到 300℃, 并抽空, 直至在此温度达到 15 微米 / 小时

或最佳的漏回率。一旦抽空并密封,就可在 30ksi,在 1150℃温度将 HIP 罐热等静压 (HIP) 4 小时。

[0044] 在 HIP 后,将仍然罐装的材料在具有流动氩的炉中加热到 1150℃温度。将罐转移到开放式模锻压机,高度以 1 英寸 / 分钟位移速率降低 50%。然后将罐从锻压机移出,并在炉中重新加热 1 小时,或直至整个罐再一次在 1150℃温度。然后将罐转移到开放式模锻压机,并以 1 英寸 / 分钟位移速率第二次缩锻 50%。然后使锻造的材料空气冷却。

[0045] 一旦冷却,机械试验样品就由锻件机械加工。特别是,以 R-C 取向机械加工出压紧拉伸 C(T) 样品。C(T) 样品符合 ASTM E647 附录 A1 中规定的几何结构。循环裂纹扩展速率试验根据 ASTM E647 进行,蠕变裂纹扩展速率试验根据 ASTM E1457 进行。

[0046] 虽然,本文仅举例说明和描述了本发明的某些特征,但本领域的技术人员会想到很多修改和变化。因此,应理解,附加权利要求将覆盖落在本发明真实精神范围内的所有此类修改和变化。

[0047] 部件清单

[0048] 100 方法

[0049] 102 步骤

[0050] 104 步骤

[0051] 106 步骤

[0052] 108 步骤

[0053] 110 步骤

[0054] 112 步骤

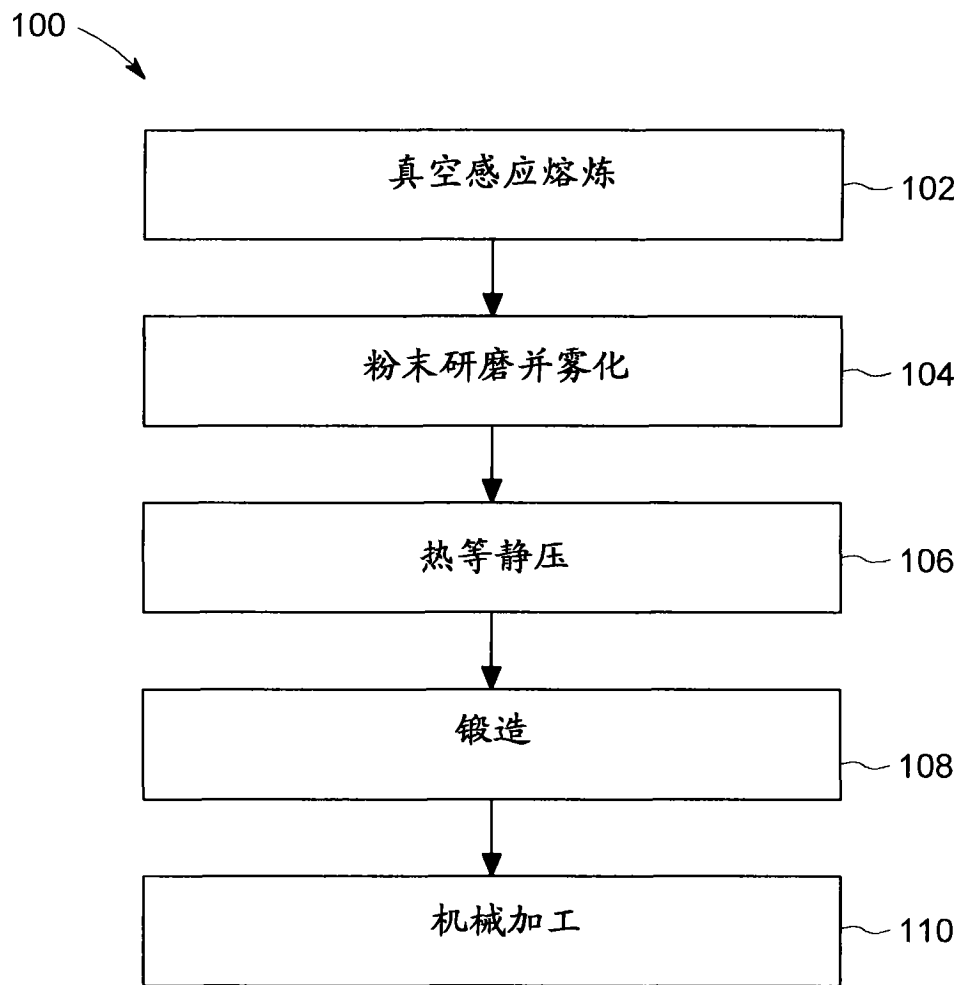


图 1