



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106957997 A

(43)申请公布日 2017. 07. 18

(21)申请号 201611128500.9

G22C 38/54(2006.01)

(22)申请日 2016.12.09

G21D 6/00(2006.01)

(30)优先权数据

F01D 5/28(2006.01)

14/965319 2015.12.10 US

(71)申请人 通用电气公司

地址 美国纽约州

(72)发明人 T.W.芬雷二世

(74)专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公

司 72001

代理人 严志军 刘林华

(51)Int.Cl.

G22C 38/44(2006.01)

G22C 38/50(2006.01)

G22C 38/06(2006.01)

G22C 38/42(2006.01)

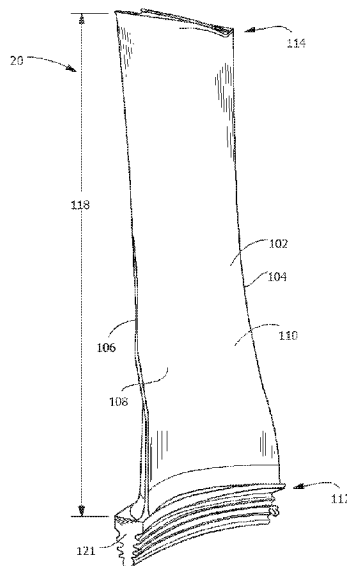
权利要求书2页 说明书8页 附图2页

(54)发明名称

蒸汽涡轮、轮叶及制造轮叶的方法

(57)摘要

本发明涉及蒸汽涡轮、轮叶及制造轮叶的方法。具体而言,一种轮叶(20)包括轮叶本体,其包括具有至少1520MPa的抗拉强度和至少41J的缺口韧性的沉淀硬化的马氏体不锈钢。轮叶本体具有至少1.15米的径向长度(118)。蒸汽涡轮(10)包括至少一个轮叶(20),其包括具有至少1520MPa的抗拉强度和至少41J的缺口韧性的沉淀硬化的马氏体不锈钢。轮叶(20)具有至少1.15米的径向长度(118)。一种制造具有至少1.15米的径向长度(118)的轮叶(20)的方法包括将具有至少1520MPa的抗拉强度和至少41J的缺口韧性的沉淀硬化的马氏体不锈钢形成为轮叶(20)。



1. 一种轮叶 (20), 包括:

轮叶本体, 其包括具有至少1520MPa (220KSI) 的抗拉强度和至少41J (30ft-lb) 的缺口韧性的沉淀硬化的马氏体不锈钢, 所述轮叶本体具有至少1.15米 (45英寸) 的径向长度 (118)。

2. 根据权利要求1所述的轮叶 (20), 其特征在于, 所述沉淀硬化的马氏体不锈钢具有至少70MPa · m^{1/2} (63.7KSI · in^{1/2}) 的断裂韧性。

3. 根据权利要求1所述的轮叶 (20), 其特征在于, 所述轮叶 (20) 为蒸汽涡轮 (10) 的长末级轮叶 (20)。

4. 根据权利要求1所述的轮叶 (20), 其特征在于, 所述沉淀硬化的马氏体不锈钢按重量百分比包括:

11.0%到12.5%的铬;

1.0%到2.5%的钼;

0.15%到0.5%的钛;

0.7%到1.5%的铝;

0.5%到2.5%的铜;

9.0%到11.0%的镍;

达到0.02%的碳;

达到2.0%的钨;

达到0.001%的硼;

铁; 以及

附带杂质。

5. 根据权利要求1所述的轮叶 (20), 其特征在于, 所述沉淀硬化的马氏体不锈钢包括具有包括以下的加工经历的不锈钢合金:

热加工所述不锈钢合金;

将所述不锈钢合金淬火; 以及

将所述不锈钢合金时效, 其中在将所述不锈钢合金时效之前未将所述不锈钢合金固溶热处理。

6. 一种蒸汽涡轮 (10), 包括:

至少一个轮叶 (20), 其包括具有至少1520MPa (220KSI) 的抗拉强度和至少41J (30ft-lb) 的缺口韧性的沉淀硬化的马氏体不锈钢, 所述轮叶 (20) 具有至少1.15米 (45英寸) 的径向长度 (118)。

7. 根据权利要求6所述的蒸汽涡轮 (10), 其特征在于, 所述沉淀硬化的马氏体不锈钢具有至少70MPa · m^{1/2} (63.7KSI · in^{1/2}) 的断裂韧性。

8. 一种制造轮叶 (20) 的方法, 包括:

将具有至少1520MPa (220KSI) 的抗拉强度和至少41J (30ft-lb) 的缺口韧性的沉淀硬化的马氏体不锈钢形成为所述轮叶 (20), 所述轮叶 (20) 具有至少1.15米 (45英寸) 的径向长度 (118)。

9. 根据权利要求8所述的方法, 其特征在于, 所述沉淀硬化的马氏体不锈钢具有至少70MPa · m^{1/2} (63.7KSI · in^{1/2}) 的断裂韧性。

10. 根据权利要求8所述的方法,其特征在於,所述沉淀硬化的马氏体不锈钢包括不锈钢合金,所述方法还包括:

热加工所述不锈钢合金;

将所述不锈钢合金淬火;以及

将所述不锈钢合金时效,其中在将所述不锈钢合金时效之前未将所述不锈钢合金固溶热处理。

蒸汽涡轮、轮叶及制造轮叶的方法

技术领域

[0001] 本发明针对蒸汽涡轮。更具体而言，本发明针对一种用于蒸汽涡轮的轮叶。

背景技术

[0002] 蒸汽涡轮中的末级轮叶 (LSB) 需要高强度和韧性。钛过于昂贵，且一些沉淀硬化 (PH) 的不锈钢 (例如，压缩机叶片材料 GTD-450, PH 马氏体不锈钢) 不能达到足够高的强度。如本文使用的“GTD-450”是指按重量包括以下成分的合金：大约 15.5% 的铬、大约 6.3% 的镍、大约 0.8% 的钼、大约 0.03% 的碳和余量的铁。

[0003] 对于大约 1.15 米 (45 英寸) 或更长的末级轮叶，需要更高强度的材料。一种选择为 PH 13-8Mo 不锈钢 (马氏体沉淀/时效硬化的不锈钢)，其可达到大于 1520Mpa (220KSI) 的极限抗拉强度 (UTS)。UTS 为材料在拉伸或受拉时在失效或断裂之前可经受的最大应力。

[0004] 如本文使用的“13-8Mo”是指按重量包括以下成分的合金：大约 12.25% 到 13.25% 的铬、大约 7.5% 到 8.5% 的镍、大约 2.0% 到 2.5% 的钼、大约 0.9% 到 1.35% 的铝、达到大约 0.1% 的硅、达到大约 0.1% 的锰、达到大约 0.05% 的碳和余量的铁。PH 13-8Mo 不锈钢能够有高强度和硬度，以及良好水平的一般腐蚀和应力腐蚀开裂抵抗性，以及在大型型材中在纵向和横向两者上的良好延性和韧性。

[0005] 尽管 LSB 中需要高抗拉强度材料，但材料的韧性对于其寿命是重要的。提高材料的抗拉强度的过程通常伴随测量为缺口韧性或冲击强度的材料的韧性降低的权衡。

[0006] 在试验中，发现用于 1.15 米 (45 英寸) 轮叶的具有足够的抗拉强度的标准 PH 13-8Mo 不锈钢材料 (AMS 5629) 具有很差的冲击强度。具有足够的抗拉强度但较差的冲击强度的其它商业材料包括但不限于 ATI S240[®] 合金 (俄勒冈州奥尔巴尼的 ATI Properties 公司)、Custom 455[®] 合金 (CRS Holdings 公司)、Custom 465[®] 合金 (CRS Holdings 公司) 和 HSL[®] 185 合金 (日本东京的 Hitachi Metals 公司)。长度较长的轮叶需要高韧性来抵抗操作的环境条件。制造较长轮叶时，强度和韧性是各种设计需求中的两个关键变量。

[0007] 由于涡轮的输出需求增加，末级轮叶继续发展到较长的径向长度。目前，通用电气生产了很昂贵的钛合金的 1.15 米 (45 英寸) 的轮叶。为了制造更长的 LSB，设计者通常必须依靠诸如钛的较低密度合金来用于超过一定长度的轮叶。为了发展到成本效益更合算的合金，高强度钢将是较廉价的。目前，通用电气使用 GTD-450 来用于一些较长的末级轮叶，但那些轮叶在最大的当前可达到的 UTS 下制造。该强度不足以用于较长长度的设计，因为钢超出钛的较高密度需要更高的强度。合金 13-8Mo 可达到期望的强度，但标准商业材料并不具有如由缺口韧性试验测得的期望韧性。

发明内容

[0008] 在实施例中，一种轮叶包括轮叶本体，其包括具有至少 1520MPa (220KSI) 的抗拉强度和至少 41J (30ft-lb) 的缺口韧性的沉淀硬化的马氏体不锈钢。轮叶本体具有至少 1.15 米 (45 英寸) 的径向长度。

[0009] 在另一个实施例中,一种蒸汽涡轮包括至少一个轮叶,其包括具有至少1520MPa (220KSI)的抗拉强度和至少41J (30ft-lb)的缺口韧性的沉淀硬化的马氏体不锈钢。轮叶具有至少1.15米(45英寸)的径向长度。

[0010] 在另一个实施例中,一种制造轮叶的方法包括将具有至少1520MPa (220KSI)的抗拉强度和至少41J (30ft-lb)的缺口韧性的沉淀硬化的马氏体不锈钢形成为轮叶。轮叶具有至少1.15米(45英寸)的径向长度。

[0011] 技术方案1. 一种轮叶,包括:

轮叶本体,其包括具有至少1520MPa (220KSI)的抗拉强度和至少41J (30ft-lb)的缺口韧性的沉淀硬化的马氏体不锈钢,所述轮叶本体具有至少1.15米(45英寸)的径向长度。

[0012] 技术方案2. 根据技术方案1所述的轮叶,其中,所述沉淀硬化的马氏体不锈钢具有至少70MPa·m^{1/2} (63.7KSI·in^{1/2})的断裂韧性。

[0013] 技术方案3. 根据技术方案1所述的轮叶,其中,所述轮叶为蒸汽涡轮的长末级轮叶。

[0014] 技术方案4. 根据技术方案1所述的轮叶,其中,所述沉淀硬化的马氏体不锈钢按重量百分比包括:

11.0%到12.5%的铬;

1.0%到2.5%的钼;

0.15%到0.5%的钛;

0.7%到1.5%的铝;

0.5%到2.5%的铜;

9.0%到11.0%的镍;

达到0.02%的碳;

达到2.0%的钨;

达到0.001%的硼;

铁;以及

附带杂质。

[0015] 技术方案5. 根据技术方案1所述的轮叶,其中,所述沉淀硬化的马氏体不锈钢包括具有包括以下的加工经历的不锈钢合金:

热加工所述不锈钢合金;

将所述不锈钢合金淬火;以及

将所述不锈钢合金时效,其中在将所述不锈钢合金时效之前未将所述不锈钢合金固溶热处理。

[0016] 技术方案6. 根据技术方案5所述的轮叶,其中,所述热加工包括锻造、冲孔、轧制和挤制中的至少一者。

[0017] 技术方案7. 根据技术方案5所述的轮叶,其中,所述热加工包括在高于所述不锈钢合金的恢复温度的热加工温度下的最终热加工道次。

[0018] 技术方案8. 根据技术方案5所述的轮叶,其中,所述热加工包括在815°C (1520°F)到1150°C (2100°F)的热加工温度下的最终热加工道次。

[0019] 技术方案9. 根据技术方案5所述的轮叶,其中,所述热加工包括将所述不锈钢合

金缩减15%到70%，所述淬火包括水淬火、冰水淬火，或水淬火继之以冰水淬火，且所述时效包括在时效时间内且在足以沉淀所述不锈钢中的至少一个硬化相的时效温度下加热。

[0020] 技术方案10. 根据技术方案9所述的轮叶，其中，所述时效温度为大约510°C (950°F) 到大约540°C (1000°F)，且所述时效时间为大约4小时。

[0021] 技术方案11. 根据技术方案5所述的轮叶，其中，所述加工经历不包括低温冷却所述不锈钢合金。

[0022] 技术方案12. 一种蒸汽涡轮，包括：

至少一个轮叶，其包括具有至少1520MPa (220KSI) 的抗拉强度和至少41J (30ft-lb) 的缺口韧性的沉淀硬化的马氏体不锈钢，所述轮叶具有至少1.15米 (45英寸) 的径向长度。

[0023] 技术方案13. 根据技术方案12所述的蒸汽涡轮，其中，所述沉淀硬化的马氏体不锈钢具有至少70MPa · m^{1/2} (63.7KSI · in^{1/2}) 的断裂韧性。

[0024] 技术方案14. 根据技术方案12所述的蒸汽涡轮，其中，所述轮叶为长末级轮叶。

[0025] 技术方案15. 根据技术方案12所述的蒸汽涡轮，其中，所述沉淀硬化的马氏体不锈钢按重量百分比包括：

- 11.0%到12.5%的铬；
- 1.0%到2.5%的钼；
- 0.15%到0.5%的钛；
- 0.7%到1.5%的铝；
- 0.5%到2.5%的铜；
- 9.0%到11.0%的镍；
- 达到0.02%的碳；
- 达到2.0%的钨；
- 达到0.001%的硼；
- 铁；以及
- 附带杂质。

[0026] 技术方案16. 根据技术方案12所述的蒸汽涡轮，其中，所述沉淀硬化的马氏体不锈钢包括具有包括以下的加工经历的不锈钢合金：

热加工所述不锈钢合金；

将所述不锈钢合金淬火；以及

将所述不锈钢合金时效，其中在将所述不锈钢合金时效之前未将所述不锈钢合金固溶热处理。

[0027] 技术方案17. 一种制造轮叶的方法，包括：

将具有至少1520MPa (220KSI) 的抗拉强度和至少41J (30ft-lb) 的缺口韧性的沉淀硬化的马氏体不锈钢形成为所述轮叶，所述轮叶具有至少1.15米 (45英寸) 的径向长度。

[0028] 技术方案18. 根据技术方案17所述的方法，其中，所述沉淀硬化的马氏体不锈钢按重量百分比包括：

- 11.0%到12.5%的铬；
- 1.0%到2.5%的钼；
- 0.15%到0.5%的钛；

0.7%到1.5%的铝；
0.5%到2.5%的铜；
9.0%到11.0%的镍；
达到0.02%的碳；
达到2.0%的钨；
达到0.001%的硼；
铁；以及
附带杂质。

[0029] 技术方案19. 根据技术方案17所述的方法,其中,所述沉淀硬化的马氏体不锈钢具有至少 $70\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ($63.7\text{KSI} \cdot \text{in}^{1/2}$)的断裂韧性。

[0030] 技术方案20. 根据技术方案17所述的方法,其中,所述沉淀硬化的马氏体不锈钢包括不锈钢合金,所述方法还包括:

热加工所述不锈钢合金;

将所述不锈钢合金淬火;以及

将所述不锈钢合金时效,其中在将所述不锈钢合金时效之前未将所述不锈钢合金固溶热处理。

[0031] 本发明的其它特征和优点将从连同附图的以下更详细的描述清楚,附图通过举例说明了本发明的原理。

附图说明

[0032] 图1为本发明的实施例中的蒸汽涡轮的示意性透视局部断面视图。

[0033] 图2为本发明的实施例中的长末级轮叶的透视图。

[0034] 只要可能,相同的参考标号将贯穿附图使用以表示相同部分。

[0035] 零件清单

10 蒸汽涡轮

12 转子

14 轴

16 涡轮区段

18 叶轮

20 轮叶

22 喷嘴

24 蒸汽

26 入口

102 叶片

104 后缘

106 前缘

108 侧壁

112 根部

114 转子叶片末梢

118 径向长度

121 燕尾部。

具体实施方式

[0036] 提供了具有高强度和高韧性的组合的长末级轮叶 (LSB)、具有长末级轮叶的蒸汽涡轮和制造长末级轮叶的方法。

[0037] 例如,相比于未包括本文公开的一个或多个特征的构想,本公开内容的实施例具有在较长末级轮叶 (LSB) 中带有提高的韧性能力的较大安全裕度、优于当前使用的钛材料的较低制造成本、获得材料的较短周期时间、优于钛的断裂韧性,或它们的组合。

[0038] 图1示出了蒸汽涡轮10,其包括具有轴14的转子12和低压 (LP) 涡轮区段16。LP涡轮区段16包括沿轴向间隔开的转子叶轮18。一系列轮叶20 (其末级在图1中标为20) 机械地联接至各个转子叶轮18。更具体而言,轮叶20布置成沿周向围绕各个转子叶轮18延伸的排。一系列静止喷嘴22沿周向围绕轴14延伸,且沿轴向定位在相邻排的轮叶20之间。喷嘴22与轮叶20协作以形成涡轮级且限定穿过蒸汽涡轮10的蒸汽流动通路的一部分。

[0039] 在操作中,蒸汽24进入蒸汽涡轮10的入口26且导送穿过喷嘴22。喷嘴22相对于轮叶20向下游引导蒸汽24。蒸汽24穿过其余级,在轮叶20上赋予力,从而引起转子12旋转。蒸汽涡轮10的至少一端可沿轴向远离转子12延伸,且可附接至可包括但不限于发电机、另一涡轮或它们的组合的负载或机器 (未示出)。

[0040] 在图1中,可看到低压蒸汽涡轮10具有多个且更具体地五个级。第一级是五个级的径向方向上最小的,其中级在径向方向上向末级在尺寸上增大,末级是最大的。

[0041] 图2示出了蒸汽涡轮10中的长末级涡轮轮叶20。轮叶20包括具有后缘104和前缘106的叶片部分102。蒸汽大体上从前缘106向后缘104流动。轮叶20还包括凹形侧壁108和凸形侧壁110。侧壁108、110沿轴向连接在后缘104和前缘106处以形成叶片102,叶片102延伸从转子叶片根部112到转子叶片末梢114的径向长度118。根部112包括用于沿蒸汽涡轮10的轴14将轮叶20联接至转子盘的燕尾部121。

[0042] 在一个实施例中,由PH马氏体不锈钢制成的末级轮叶20具有至少且优选大于1.15米 (45英寸) 的径向长度118。PH马氏体不锈钢具有提高的韧性,同时仍保持足够的强度。PH马氏体不锈钢具有至少1520MPa (220KSI) 的抗拉强度和至少41J (30ft-lb) 的缺口韧性。PH马氏体不锈钢还优选具有至少 $70\text{Pma} \cdot \text{m}^{1/2}$ ($63.7\text{KSI} \cdot \text{in}^{1/2}$) 的断裂韧性。在一些实施例中,PH马氏体不锈钢为13-8合金 (UNS S13800)。在一些实施例中,PH马氏体不锈钢为在AMS 5934下从ATI Properties公司 (奥尔巴尼,俄勒冈州) 以商品名Supertough®市售的PH 13-8Mo不锈钢的形式。

[0043] 可应用于本方法和/或设备的另一PH马氏体不锈钢为MLX17™合金 (法国巴黎的Aubert & Duval)。如本文使用的“MLX17”是指按重量包括以下成分的合金:大约11%到12.5%的铬、大约10.25%到11.25%的镍、大约1.75%到2.25%的钼、大约1.35%到1.75%的铝、大约0.2%到0.5%的钛、达到大约0.25%的硅、达到大约0.25%的锰、达到大约0.02%的碳和余量的铁。

[0044] 在一些实施例中,PH马氏体不锈钢按重量包括大约11.0%到15.0%的铬、大约5.0%到11.0%的镍、大约1.0%到2.5%的钼、大约0.7%到1.5%的铝、达到大约2.5%的铜、达到大约

2.0%的钨、达到大约0.5%的钛、达到大约0.02%的碳、达到大约0.001%的硼、附带杂质和余量的铁。

[0045] 在一些实施例中,PH马氏体不锈钢按重量包括大约11.0%到12.5%的铬、大约1.0%到2.5%的钼、大约0.15%到0.5%的钛、大约0.7%到1.5%的铝、大约0.5%到2.5%的铜、大约9.0%到11.0%的镍、达到大约0.02%的碳、达到大约2.0%的钨、达到大约0.001%的硼、附带杂质和余量的铁。

[0046] 在一些实施例中,PH马氏体不锈钢包括具有包括以下的加工经历的不锈钢合金:热加工不锈钢合金、将不锈钢合金淬火,以及将不锈钢合金时效。不锈钢合金在时效之前未固溶热处理。在一些实施例中,热加工包括锻造、冲孔、轧制、挤制或它们的组合。加工经历优选不包括低温冷却不锈钢合金。

[0047] 在一些实施例中,热加工包括在高于不锈钢合金的恢复温度的热加工温度下的最终热加工道次。在一些实施例中,热加工包括在815°C到1150°C (1500°F到2100°F)的热加工温度下的最终热加工道次,备选地870°C到1095°C (1600°F到2000°F),备选地925°C到1040°C (1700°F到1900°F),备选地925°C到1010°C (1700°F到1850°F),或它们的任何适合的组合、子组合、范围或子范围。

[0048] 在一些实施例中,热加工包括使不锈钢合金减少大约15%到70%,备选地大约18%到大约42%,或它们的任何适合的组合、子组合、范围或子范围。淬火优选包括水淬火、冰水淬火或水淬火继之以冰水淬火,且时效优选包括在时效时间内且在足以沉淀不锈钢中的至少一个硬化相的时效温度下的加热。

[0049] 在一些实施例中,时效温度为大约510°C到540°C (950°F到1000°F),备选地大约510°C到530°C (950°F到985°F),备选地大约510°C到520°C (950°F到970°F),备选地大约425°C到650°C (800°F到1200°F),备选地大约455°C到595°C (850°F到1100°F),备选地大约480°C到565°C (900°F到1050°F),备选地大约540°C (1000°F),或它们的任何适合的组合、子组合、范围或子范围,且时效时间为大约4小时。

[0050] 末级轮叶20具有至少1.15米(45英寸)的径向长度118,备选地大于1.15米(45英寸),备选地至少1.27米(50英寸),备选地至少1.37米(54英寸),备选地至少1.52米(60英寸),备选地在1.15米到1.52米(45到60英寸)的范围中,备选地在1.27到1.37米(50到54英寸)的范围中,备选地在1.37到1.52米(54英寸到60英寸)的范围中,或它们的任何适合的组合、子组合、范围或子范围。

[0051] 在一些实施例中,处理不锈钢合金仅依靠使用热加工的塑性变形,而没有热加工之后的任何繁重冷加工。热加工或热塑性加工可包括但不限于锻造(包括开模和闭模锻造)、冲孔、轧制和挤制。在一些实施例中,仅加工温度和缩减的成品道次(即,最终热加工步骤)在热加工中控制。成品道次之前的热加工可在宽范围的温度和缩减的组合下进行。

[0052] 最终热加工道次的百分比缩减影响热机械处理的PH马氏体不锈钢的机械性质。在适用于长产品(诸如但不限于长末级轮叶20)的实施例中,成品道次中的百分比缩减可指轮叶20的截面面积的减小。在其它实施例中,成品道次中的百分比缩减可指厚度的缩减。

[0053] 在热加工之后,将PH马氏体不锈钢淬火。淬火可包括但不限于水淬火、利用水溶液淬火,包括但不限于盐水溶液、油淬火、在水和油的混合物中淬火或它们的组合。在一些实施例中,淬火池的初始温度为大约18°C (65°F),备选地不超过大约38°C (100°F),备选地在

18°C到38°C (65°F到100°F) 的范围中,或它们的任何适合的组合、子组合、范围或子范围。在一些实施例中,将PH马氏体不锈钢淬火直到钢的温度不大于大约149°C (300°F)。

[0054] 在一些实施例中,在淬火之后,PH马氏体不锈钢在大约两小时的保持时间内浸没且保持在冰水中。在一些实施例中,保持时间在大约2小时到大约24小时的范围内。备选地,任何冷却池都可在本发明的精神内使用以将PH马氏体不锈钢保持在低于大约10°C (50°F) 的温度下,备选地在0到10°C (32°F到50°F) 的范围内,备选地在0到4°C (32°F到40°F) 的范围内,备选地在-40°C到10°C (-40°F到50°F) 的范围内,备选地在-40°C到4°C (-40°F到40°F) 的范围内,备选地在-34°C到10°C (-30°F到50°F) 的范围内,备选地在-29°C到4°C (-20°F到40°F) 的范围内,备选地在-23°C到4°C (-10°F到40°F) 的范围内,备选地在-18°C到5°C (0到40°F) 的范围内,或它们的任何适合的组合、子组合、范围或子范围。在一些实施例中,将PH马氏体不锈钢保持在大约冰水的温度(0到4°C) 下稳定了在热加工步骤的热塑性变形期间形成的残留子结构。PH马氏体不锈钢优选在热加工之后不经历深冷温度。在一个实施例中,PH马氏体不锈钢在热加工之后未经历深冷温度。如本文使用的深冷温度是指低于大约-40°C (-40°F) 的任何温度。

[0055] 在淬火或将PH马氏体不锈钢保持在低于大约10°C (50°F) 的温度下之后,PH马氏体不锈钢在升高的温度下时效。时效(也称为沉淀时效或时效硬化) 优选提供马氏体钢基体中的增强微粒的受控沉淀。时效优选导致分布在马氏体晶粒各处的细增强微粒的沉淀。时效包括不同温度下的多个时效步骤,有利地用于改善PH马氏体不锈钢的机械性质。

[0056] 在一些实施例中,时效时间为大约4小时或较短。其它时效时间和温度可针对特定合金确定。时效可包括以时效时间和足以用于沉淀一个或多个硬化相的时效温度的任何组合加热PH马氏体不锈钢。

[0057] PH马氏体不锈钢具有至少1520MPa (220KSI) 的抗拉强度,备选地至少1550MPa (225KSI), 备选地至少1585MPa (230KSI), 备选地至少1620MPa (235KSI), 备选地在1520到1620MPa (220到235KSI) 的范围内,备选地在1550到1585MPa (225到230KSI) 的范围内,或它们的任何适合的组合、子组合、范围或子范围。

[0058] PH马氏体不锈钢具有至少41J (30ft-lb) 的缺口韧性,备选地至少47J (35ft-lb), 备选地至少54J (40ft-lb), 备选地至少61J (45ft-lb), 备选地至少68J (50ft-lb), 备选地至少75J (55ft-lb), 备选地在41到75J (30到55ft-lb) 的范围内,备选地在47到68J (35到50ft-lb) 的范围内,备选地在54到61J (40到45ft-lb) 的范围内,或它们的任何适合的组合、子组合、范围或子范围。缺口韧性由夏氏冲击试验测得。夏氏冲击试验是标准化的高应变率试验,用以确定在断裂期间由PH马氏体不锈钢吸收的能量量。

[0059] PH马氏体不锈钢优选具有至少 $70\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ($63.7\text{KSI} \cdot \text{in}^{1/2}$) 的断裂韧性,备选地至少 $75\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ($68.3\text{KSI} \cdot \text{in}^{1/2}$), 备选地至少 $80\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ($72.8\text{KSI} \cdot \text{in}^{1/2}$), 备选地至少 $85\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ($77.4\text{KSI} \cdot \text{in}^{1/2}$), 备选地至少 $90\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ($81.9\text{KSI} \cdot \text{in}^{1/2}$), 备选地至少 $95\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ($86.5\text{KSI} \cdot \text{in}^{1/2}$), 备选地在 70 到 $95\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (63.7 到 $86.5\text{KSI} \cdot \text{in}^{1/2}$) 的范围内,备选地在 75 到 $90\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (68.3 到 $81.9\text{KSI} \cdot \text{in}^{1/2}$) 的范围内,备选地在 80 到 $85\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (72.8 到 $77.4\text{KSI} \cdot \text{in}^{1/2}$) 的范围内,或它们的任何适合的组合、子组合、范围或子范围。断裂韧性为基于如由标准化的线弹性平面应变断裂韧性试验测得的不稳定的裂纹增长的开始对于PH马氏体不锈钢的测得的线弹性断裂韧性(K_{IC} 值)。

[0060] 具有至少1.15米(45英寸)的径向长度118的长末级轮叶20可由保持或实现向PH马氏体不锈钢赋予的期望物理性质的任何方法形成,诸如由上述加工经历赋予的那些。在保持或实现期望的物理性质的加工经历之前、期间或之后,长末级轮叶20可定形为最终形式。在一些实施例中,长末级轮叶20通过锻造工艺形成。在一些实施例中,长末级轮叶20从轧制或热处理的条加工。

[0061] 尽管参照一个或多个实施例描述了本发明,但本领域的技术人员将理解的是,在不脱离本发明的范围的情况下可作出各种变化且对于其元件可替换等同物。此外,可作出许多改型来使特定情形或材料适于本发明的教导内容而不脱离其基本范围。因此,期望本发明不限于公开为针对执行本发明构想的最佳模式的特定实施例,而是本发明将包括落入所附权利要求的范围内的所有实施例。此外,在详细描述中标出的所有数值都应当理解为好像准确值和近似值两者都明确指出那样。

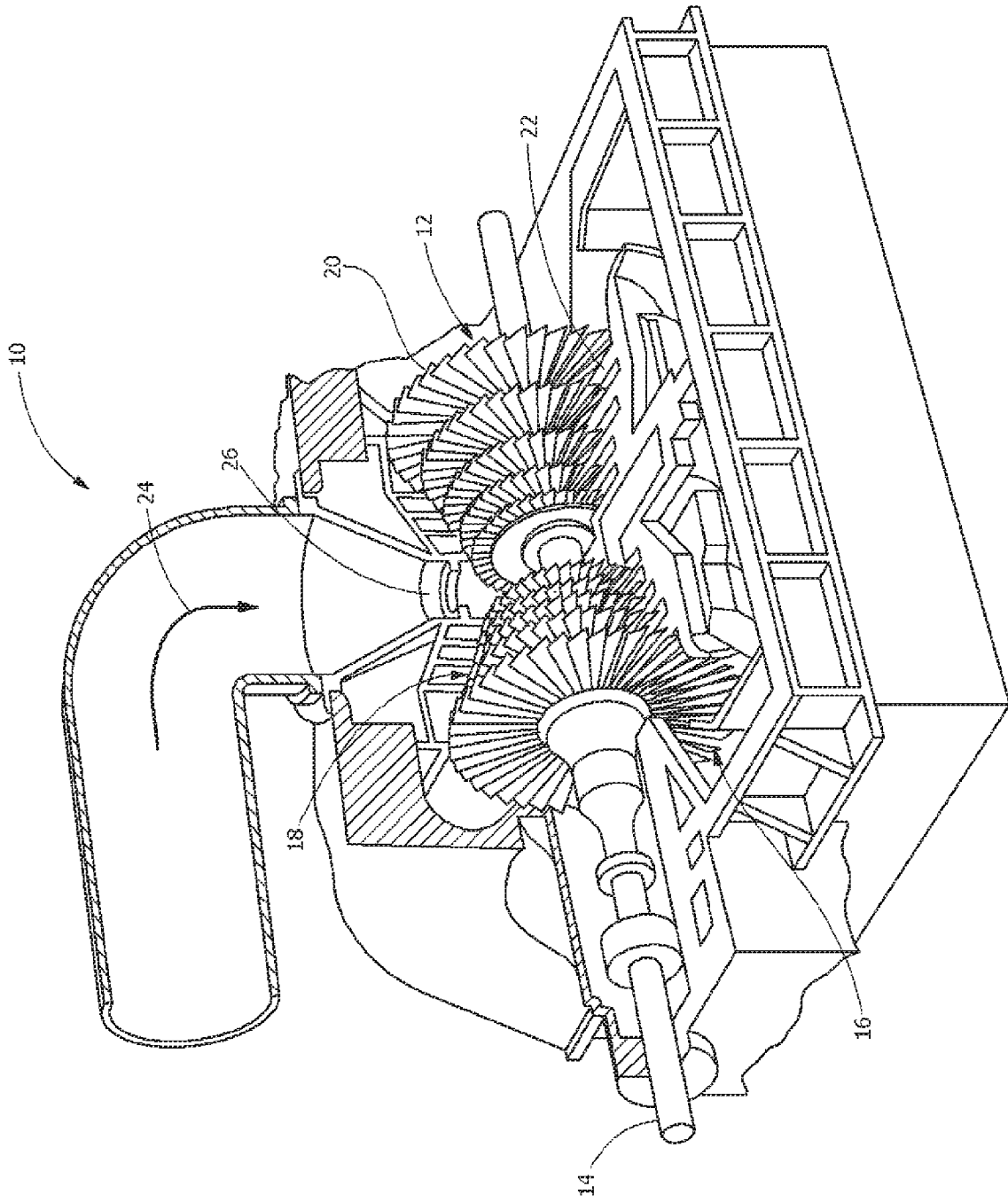


图 1

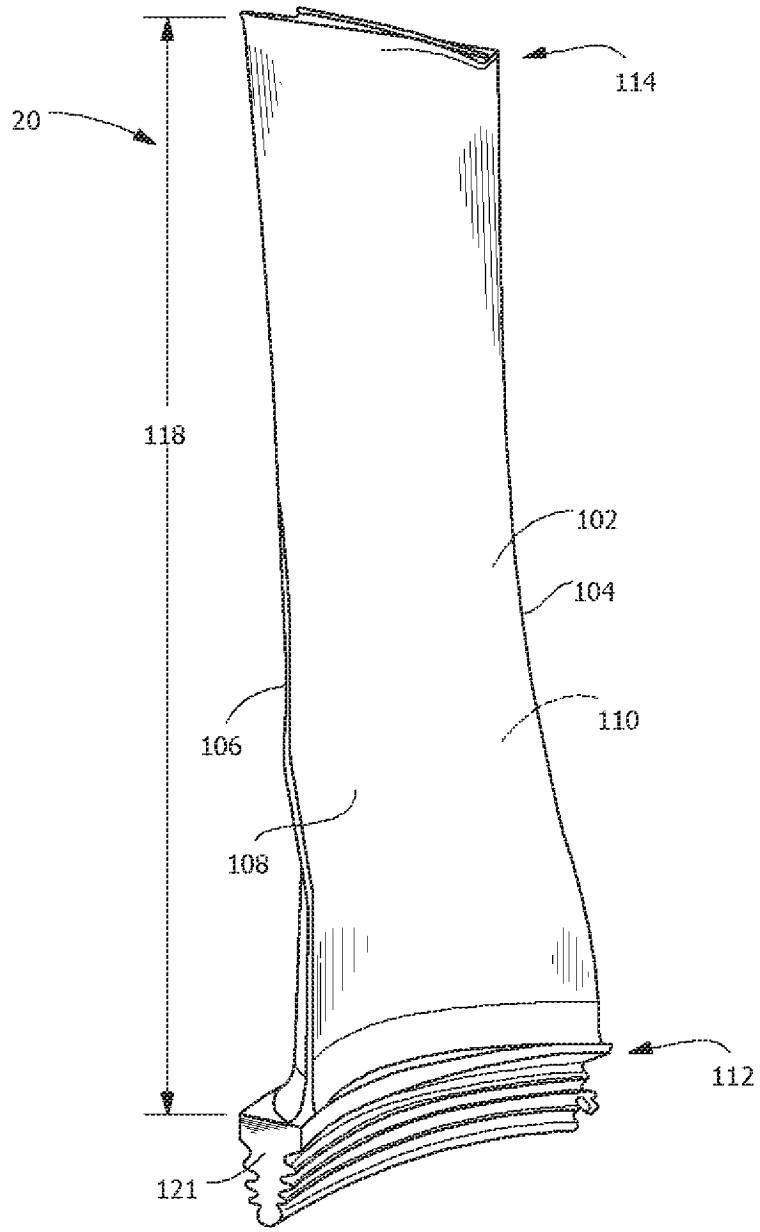


图 2