



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106715935 B

(45)授权公告日 2020.04.03

(21)申请号 201580045758.X

(22)申请日 2015.08.17

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 106715935 A

(43)申请公布日 2017.05.24

(30)优先权数据
14/469,382 2014.08.26 US
14/811,012 2015.07.28 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2017.02.24

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2015/045545 2015.08.17

(87)PCT国际申请的公布数据
W02016/032788 EN 2016.03.03

(73)专利权人 安珀动力能源公司
地址 美国加利福尼亚州

(72)发明人 S·桑德斯 E·孙 M·何
M·塞内斯基 E·齐奥

(74)专利代理机构 上海专利商标事务所有限公
司 31100

代理人 李丹丹

(51)Int.Cl.
F16C 32/04(2006.01)
F16F 15/03(2006.01)

(56)对比文件
CN 1247139 A,2000.03.15,
US 6825588 B2,2004.11.30,
US 2004256929 A1,2004.12.23,
US 3436572 A,1969.04.01,
US 5866066 A,1999.02.02,
US 4408500 A,1983.10.11,

审查员 马稚懿

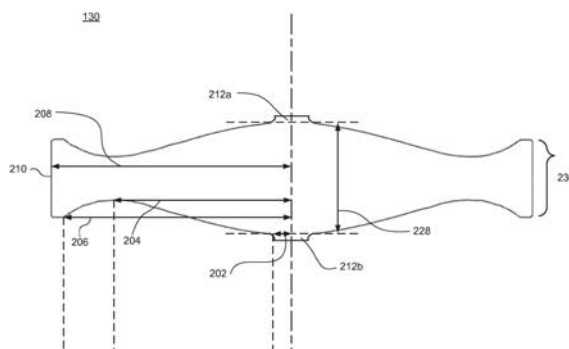
权利要求书2页 说明书7页 附图4页

(54)发明名称

飞轮转子

(57)摘要

一种具有改进的材料特性的实心钢飞轮转子在降低的成本下提供改进的能量存储。本发明还提供用于制造转子的方法。



1. 一种飞轮转子,其包括由单片的合金钢制成的旋转对称质量,所述合金钢包括300M钢,它能实现厚截面的贯通硬化,其中所述合金钢被加热并被淬火以使所述质量的贯通硬化,

所述质量具有:

至少900MPa的屈服强度,

至少 $40\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 的断裂韧性,和

2mm或更小的最大固有缺陷尺寸;

所述质量具有沿着比沿着第二轴线的最宽厚度更大的沿第一轴线的直径,所述最宽厚度在8英寸和14英寸之间,所述质量构造为围绕所述第二轴线旋转。

2. 根据权利要求1所述的飞轮转子,其特征在于,不包括穿过所述质量的中心轴线的孔。

3. 根据权利要求1所述的飞轮转子,其特征在于,所述断裂韧性在 $120\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 到 $200\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 的范围内。

4. 根据权利要求1所述的飞轮转子,其特征在于,还包括从所述质量突出的多个轴颈,每个轴颈成形为物理地耦合到轴。

5. 根据权利要求1所述的飞轮转子,其特征在于,所述转子具有2吨到5吨范围内的质量。

6. 根据权利要求1所述的飞轮转子,其特征在于,所述质量具有在36英寸到72英寸范围内的外径。

7. 根据权利要求1所述的飞轮转子,其特征在于,所述质量由贯通硬化和回火的300M钢制成,使用真空电弧重熔(VAR)工艺、电渣重熔(ESR)工艺以及真空感应熔炼(VIM)工艺中的一个形成。

8. 根据权利要求1所述的飞轮转子,其特征在于,所述质量包括鱼尾形状。

9. 一种飞轮转子,其包括由单片贯通硬化和回火的300M钢制成,使用真空电弧重熔工艺、电渣重熔工艺以及真空感应熔炼工艺中的一种形成的旋转对称本体,

所述本体具有沿着比沿着第二轴线的最宽厚度更大的沿第一轴线的直径,所述最宽厚度在8英寸和14英寸之间;

从所述本体突出的多个轴颈,每个轴颈成形为物理地耦合到轴,

其中,所述本体构造为围绕所述第二轴线旋转。

10. 根据权利要求9所述的飞轮转子,其特征在于,所述本体具有至少900Mpa的屈服强度。

11. 根据权利要求9所述的飞轮转子,其特征在于,所述本体具有至少 $40\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 的断裂韧性。

12. 根据权利要求9所述的飞轮转子,其特征在于,所述本体具有等于或小于2mm的最大固有缺陷尺寸。

13. 根据权利要求9所述的飞轮转子,其特征在于,所述本体不包括穿过所述转子的质量的中心轴线的孔。

14. 根据权利要求9所述的飞轮转子,其特征在于,所述本体的断裂韧性在 $120\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 到 $200\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 的范围内。

15. 根据权利要求9所述的飞轮转子, 其特征在于, 所述转子具有2吨到5吨范围内的质量。

16. 根据权利要求9所述的飞轮转子, 其特征在于, 所述本体具有36英寸到72英寸范围内的外径。

17. 根据权利要求9所述的飞轮转子, 其特征在于, 所述本体包括鱼尾形状。

18. 一种用于制造飞轮转子的方法, 包括:

使多个元素合金化以形成300M钢的单片质量, 所述质量具有比沿着第二轴线的最宽厚度更大的沿着第一轴线的直径, 所述最宽厚度在8英寸和14英寸之间;

使用真空电弧重熔工艺、电渣重熔工艺以及真空感应熔炼工艺中的一个精炼所述质量;

执行多步锻造工艺以在所述质量内对准晶粒尺寸和方向;

加热和淬火所述质量以使所述质量贯通硬化;

回火所述质量; 以及

加工所述质量。

飞轮转子

[0001] 政府权利说明

[0002] 本发明在政府支持下根据由美国能源部授予的合同OE-0000232做出。政府在对本发明中有一定权利。

[0003] 背景

技术领域

[0004] 本说明书一般来说涉及能量存储,并且具体来说涉及使用飞轮的能量存储。

背景技术

[0005] 许多能量源,具体来说清洁能源如风力涡轮机和太阳能板,产生并不暂时匹配所经历的负载的能量。在许多发达国家,能量产生遵循所经历的负载,使得根据需要提供能量。在高负载的环境下,诸如使用风化发生器以及在热发电机上的旋转和非旋转储备的技术允许匹配高和可变负载的产生。然而,尽管有这些技术可用,通常存在能量存储对满足能量负载是很重要的情况。

[0006] 现有能量存储系统都具有这样或那样的缺点。当设计能量存储系统时,尺寸、价格、存储效率、功效和安全都是关注点。一般来说,较小尺寸、较低价格、减少的输入用于存储的能量和提取用于分配的能量损失、减少的用于连续操作的损失和安全处置都是能量存储系统的优选特性。

[0007] 飞轮是一种类型的将能量存储为转动动能的能量存储系统。飞轮转子带配重的旋转对称质量,其在直接或间接物理联接到电动机/交流发电机时旋转,电动机/交流发电机本身电联接到转换器,例如背靠背逆变器系统,构成AC-AC 转换子系统。当接收功率用于存储时,驱动转子,增加飞轮转子的旋转速度。当提取功率时,飞轮转子驱动电动机/交流发电机。飞轮转子可旋转的速度越快,就可以存储越多能量,但在转子上产生的应力越大。一般来说,转子在操作时能够维持的应力的量是用于制造转子的设计、材料和过程的函数。具体来说,可以维持的应力的量取决于转子材料的屈服强度、断裂韧性、最大具有缺陷尺寸、循环疲劳特性和转子的形状等的组合。一般来说,飞轮轴承和悬挂子系统经设计以最小化由于摩擦和其它损失源的能量损失。

[0008] 相对于可以存储的能量的量的成本对于飞轮系统尤其重要。飞轮系统的成本可大致分为两部分,制造飞轮转子的成本和用于支撑元件如轴承、安装件、外壳等的系统成本的平衡。在过去,飞轮转子的制造非常昂贵。因此,飞轮系统已主要用于包括仅几秒到几分的能量存储的应用中,因为制造可存储几十到几百kWh能量的单个转子或使用相对于用于连同转子一起使用的支撑元件的系统成本的平衡成本效率低下的许多独特转子简直太贵。

[0009] 一些现有的飞轮转子由常见、低合金钢如美国钢铁协会(AISI) 4340和 AISI 4140制成。这些钢具有低成本和其它期望特性,然而此类转子由于贯通硬化性的局限性被限制于薄片,其被要求获得有用的屈服强度并因此可处理显著量的应力。举例来说,尽管这些转子材料可实现2帕斯卡(GPa) 的极限抗拉强度(UTS) 和4兆帕平方根米(MPa^{0.5}) 的断裂韧

性,但是此类转子被限于最大化3-6英寸的截面厚度。

[0010] 其它钢制飞轮转子用高合金钢如马氏体时效钢、镍钴合金钢和一些不锈钢制成。这些飞轮转子能够贯穿大于6英寸的截面厚度维持较高应力。这些转子实现这些应力而不需要多种分离式截面,而是由于高含量的昂贵合金元素如镍和钴而成本高昂。其它现代飞轮转子由碳纤维制成并因此允许显著较高工作应力,然而碳纤维和实现相应的较高旋转速度所需的辅助部件的高成本使得碳纤维转子过于昂贵,尽管它们有高工作应力与重量比。

发明内容

[0011] 本发明描述一种能量存储系统,其包括飞轮转子、轴颈和用于连接到轴颈的单独的短轴。飞轮转子是由单片钢制成的旋转对称质量。轴颈在质量的中心旋转轴线上居中,在质量沿着中心轴线竖直定向的实施方式中位于质量的顶部和底部。两个短轴也是基本上旋转对称的,并且各自物理连接到轴颈中的一个。

附图说明

[0012] 图1是根据一个实施例的飞轮能量存储系统的框图。

[0013] 图2是根据一个实施例的飞轮转子的横截面图。

[0014] 图3是根据一个实施例的飞轮转子的轴颈和连接的短轴的横截面图。

[0015] 图4是根据一个实施例的用于制造飞轮转子的示例性过程。

[0016] 附图仅出于说明的目的描绘了本发明的实施例。本领域技术人员将从以下讨论容易地认识到,在不脱离本文所述的本发明的原理的情况下可以采用本文所示的结构和方法的替代实施例。

具体实施方式

[0017] I. 飞轮能量存储系统

[0018] 图1是根据一个实施例的飞轮能量存储系统100的框图。能量存储系统包括飞轮转子130、电动机/交流发电机140、第一逆变器150、电容器160、第二逆变器170和AC线180。能量从AC线180抽取或递送到AC线180, AC线180例如常规的三相60Hz线。第一逆变器150和第二逆变器170以及电容器160示出了用于将输入交流电转换成电动机/交流发电机140可接受的交流电的示例性背靠背变换器系统。电动机/交流发电机140在电力与机械能量之间转变,使得能量可以存储在飞轮转子130中或从飞轮转子130 吸取。电动机/交流发电机140使用短轴190直接或间接地物理联接到飞轮转子130。可使用磁性轴承元件(未示出)以帮助减少系统中的横向运动、离轴旋转和摩擦。电动机/交流发电机140经由电线或其它电连接器联接到系统100的其余部分。一般来说,虽然仅示出每个部件中的一个,但是实际上飞轮能量存储系统100可以包括数倍个每个单独部件。图1是交流到交流转换系统的一个示例性类型。一般来说,本文所述的本发明涉及宽范围的交流到交流转换拓扑,以及直接与直流(dc)线接口的系统。后者具有对直流微电网和太阳能光伏应用的特别相关性。

[0019] II. 飞轮转子形状

[0020] 图2是根据一个实施例的飞轮转子130(或简称为转子)的横截面图。转子130由单一质量的材料形成。然而,转子130的两个不同部分通常可说成是执行不同的功能。主旋转

质量230构成转子的大部分质量并且存储由转子存储的大部分动能。两个轴颈212从主旋转质量的任一侧垂直延伸并且辅助将转子联接到分离轴(未示出)。以下进一步描述这些部分中的每一个。在一些情况下,转子还可以包括在其外表面上的元件,例如离散质量以提供离心负载。

[0021] 转子通常是旋转对称的,因此可以使用圆柱坐标系来描述转子,其中原点通过转子的中心旋转轴线。在包括外表面上的其它元件(例如离散质量)的实施方式中,转子和离散质量元件均围绕原点均匀分布。

[0022] 为了提供标度的实例,在一个实施例中,转子130的直径在36-72英寸之间,重量在2-5吨之间。

[0023] II.A主旋转质量

[0024] 除了旋转对称之外,主旋转质量可以形成各种不同的形状,每个形状被设计成实现特定的性能目标。在一个实施方式中,当在横截面中观察时,转子的主旋转质量230具有“鱼尾”形状。

[0025] 鱼尾形状有助于确保由于在转子上施加的旋转力而在整个主旋转质量 230上的应力的近似均匀的分布。鱼尾形状是用于优化转子质量和材料体积利用率(即用于优化形状因子)的示例性形状。通常,鱼尾形状包括中心部分和邻接的周边质量。在中心部分中,转子在靠近中心轴线226处更靠近第一半径202处更厚,并且在厚度上远离原点连续减小到第二半径204。在一个实施例中,该中心部分由以下形式的轮廓控制:

$$[0026] \quad t = h e^{-\beta r^2} \quad (1)$$

[0027] 其中 t 是转子的纵向厚度, h 是中心厚度, r 是沿着极轴离开原点的距离,并且 β 是常数。

[0028] 关于在第二半径204与靠近转子的外径210的第三半径206之间的外周质量的形状,主旋转质量230在纵向轴线上的厚度连续增加。在第三半径206与第四半径208之间,转子在纵向轴线上沿着极轴保持短距离的一致厚度。第四半径208沿着极轴位于转子的外表面210处或附近。在第四半径208附近,转子的边缘可以是圆形或正方形的。

[0029] 关于中心部分相对于周边质量的相对比例,鱼尾部分的大部分质量位于中心部分。

[0030] 在图2所示的实例中,转子130的外表面210具有大于转子130的鱼尾部分的最宽厚度228的直径。如下面将进一步描述的,允许整个转子贯通硬化的任何形状的转子能够实现相对高水平的工作应力。一般来说,直径大于其厚度的转子以比其厚度大于其直径的对应物更慢的速度旋转。较慢的旋转速度降低了允许转子旋转的轴承组件的操作要求,从而降低飞轮系统的总成本。

[0031] 在另一个实施例中,转子不是具有鱼尾形状,而是具有圆柱形形状。

[0032] II.B轴颈和短轴

[0033] 沿着转子的纵向轴线(或中心旋转轴线),转子包括用于附接和分离两个轴的两个轴颈212,用于在转子与双向电动机/交流发电机140之间传递能量。轴颈212消除了对将转子联接到轴的孔的需要。孔导致在孔的内径处的环向应力的加倍。此类孔通常在制造转子之后钻入转子中,或转子被有意地设计和制造成具有这样的孔。相反,用轴颈212替换孔使得应力能够更均匀地分布在主旋转质量上,从而避免了将另外放置孔的应力梯级。

[0034] 图3是根据一个实施例的转子的轴颈212和连接的短轴的横截面图。每个轴颈212沿着质量的纵向轴线从厚度增加的隆起214向外延伸218,该隆起214本身从主旋转质量230的中心部分的原点向外延伸。隆起214具有锥形形状,其邻近轴颈212厚度最大,并且随着半径增加其厚度逐渐变小。隆起214的逐渐变细的形状使轴颈在轴颈212邻接主旋转质量230的点处经历应力梯级或峰值应力。

[0035] 圆角存在于其中轴颈212与隆起214接合处。圆角避免了围绕轴颈212 的应力梯级。轴颈的外/顶表面基本上是平面的,并且垂直于极轴。轴颈212 的外表面比构造成附接到轴颈212的轴226的连接端222窄220。然后短轴在其长度的大部分处变窄成较窄的外径224。短轴的总长度可以根据实施方式而变化。轴还可包括其自身的圆角(未示出),以在轴的窄部224部分与轴的连接端222之间的接合处更均匀地分布弯曲应力。

[0036] 一般来说,过盈配合位于轴颈212的外径与短轴的连接端222的内径之间的边界处的直径220大于短轴的大部分长度的直径224。具有用于过盈配合的相对大直径220有利于进一步减小在轴颈212附近的转子130内部的应力梯级,因为在这种大直径下仅需要相对轻的过盈配合。此外,在轴颈区域中引起的过盈应力通常是压缩的,并且因此用于减轻轴颈212中的离心引起的应力。因此,轴颈212的锥形形状与宽直径220的组合导致用于联接该轴的机构最小化联接在作为整体的转子130上的应力冲击。

[0037] 在一个实施例中,轴226通过收缩配合联接到轴颈212。例如,轴可以在附接到轴颈212之前被加热,从而导致轴热膨胀。在加热之后,可以附接轴颈212和轴。然后允许轴冷却,从而热收缩以与轴颈212形成过盈配合。在另一个实施例中,可以使用内部压配合,其中轴的冷却用于在轴颈212与轴226之间产生过盈配合。轴226也可以通过压配合或者如果使用中空圆柱形轴则具有中心轴线向定向的保持螺栓联接到轴颈212。这些是用于将轴226联接到轴颈212的多种替代方案的实例。

[0038] 作为一个实例,在一个实施例中,轴颈212具有约3-8英寸的外径,并且从隆起向外突出0.5英寸到2英寸之间(包括端值)的距离。轴具有在 4-10英寸之间(包括端值)的连接端222外径,以及经设计成匹配(经由过盈配合)轴颈的外径(例如,大约3-8英寸)的内径。过盈配合是千分之一或百分之一英寸的数量级(例如,2-10千英寸)。也就是说,虽然轴颈212的外径和轴的内径二者的示例性直径都列出为3-8英寸,但实际上它们的直径将彼此相差基于过盈配合的接近度的量(例如,4英寸,一个比另一个大或小0.0003英寸)。远离连接端,轴具有1-3英寸之间(包括端值)的外径224,其比轴颈212的外径窄。

[0039] 在实践中,对于轴颈212的直径(和轴的连接端222的相关内径) 没有上限,因为较大的直径性能更好。然而,存在与制造满足下面阐述的侧载荷要求的轴相关联的成本和困难。一般来说,轴颈212的直径越大,在制造期间需要从转子质量去除的材料越少,这降低了制造成本。然而,形成具有大连接端222和窄半径224的轴226需要从用于轴的较大起始块移除附加材料,这增加了制造成本。此外,大的连接端222是不耐用的,并且可能使包括转子和轴的飞轮系统的构造更加复杂。

[0040] 轴颈212从转子向外延伸218仅很短的距离。虽然较大的向外距离218 将导致转子上的更好的过盈配合和更好的压缩应力,但是不一定可以延伸距离218同时仍实现本文所述的转子的性能特性。其原因是轴颈向外延伸越远,转子必须具有的材料起始块越大,并且必须从起始转子质量去除更多的材料以获得最终的转子形状,这两者都增加制造转子的

成本。此外,如下面参照图4所描述,转子材料的起始块可经历多个处理以在转子被加工成其最终形状之前影响其性质(强度等)。一种此类处理是硬化,其中对于材料可以硬化到的质量存在上限。如果质量比该上限厚,则不可能使材料整个质量贯通硬化。因此,并不总是可以以更大的材料块开始,以便使轴颈212向外延伸218更远,并且还使整个转子质量贯通硬化。

[0041] 轴226经设计成承受显着的侧向负载。这些弯曲应力在连接端222附近最高。一般来说,转子将被操作以围绕平行于地球重力的轴线旋转。然而,轴226经设计成使得如果转子被倾斜或者如果转子被操作以围绕垂直于地球重力的轴线旋转,则转子将仍然是完全可操作的。在一个实施例中,轴226经设计成在没有变形或失效的情况下处理1G(9.80665米每平方秒)的侧向负载。在该实施例的一个实例中,在1G侧向负载下在轴226上的峰值弯曲应力为170MPa,并且屈服/极限拉伸强度在500MPa-1.5GPa之间。可以制造以满足这些标准的合金的实例是AISI 4340,尽管其它合金也可以满足这些标准。

[0042] 除了在负载下满足材料强度的约束外,轴长度和直径可以经设计成实现选择的弯曲刚度。在一个实施例中,此选择的弯曲刚度在25-200牛顿每微米(N/μm)之间(例如,70N/μm),其中刚度是指在轴的端部处的侧向负载,导致20-60赫兹(Hz)之间的质量频率的横向中心。可以选择此弯曲刚度以设置横向和扭转顺从性,从而设置飞轮转子悬挂子系统的横向和扭转共振模式。此顺从子系统将刚性体转子有效地连接到通常刚性的壳体。壳体可以锚定到地,或者可以通过辅助悬挂(通常为基脚)与地隔离。一般来说,谐振模式简单地在零速度处确定,然后转移到质量的横向中心和旋转模式,因为转子速度增加为高于零的速度。

[0043] 包括主旋转质量230和轴颈212的转子被制造为单片材料,例如使用下面描述的示例性材料和示例性过程。因此,转子具有单体结构,其中在主旋转质量与轴颈212之间没有焊缝、接头、接缝、孔或结构上的差异。然而,还如下面进一步描述,单体/单片转子的不同部分可以经受不同的处理和/或制造工艺以在不同点处改变转子的性质。例如,转子的表面可以接收与转子的内部不同的处理。

[0044] III. 转子材料性能和制造。

[0045] 转子的性能基于构成转子的材料的几个参数,以及在原材料出现在转子中时将原材料转换成最终状态的制造过程。这些参数包括转子的屈服强度、转子的断裂韧性、转子中的最大固有缺陷尺寸(或最大初始裂纹尺寸)和循环疲劳(或循环裂纹生长速率)。转子也可以根据这些性质的已知等效物或可以转换成/衍生自这些性质的其它性质来描述。

[0046] 在一个实施例中,转子具有参数值,使得转子的屈服强度 $\sigma_{\text{屈服}}$ 大于第一阈值,转子的断裂韧性 $\sigma_{\text{断裂}}$ 大于第二阈值,并且最大固有缺陷尺寸 $a_{\text{固有}}$ 小于阈值大小。以这种方式定义,转子在其工作寿命期间可以承受的工作应力 $\sigma_{\text{工作}}$ 中实现显着的性能。在操作期间转子将总是满足以下条件:

[0047] $\sigma_{\text{工作}} \leq \sigma_{\text{屈服}} \alpha \quad (1)$

[0048] 其中 α 是用于在0与1之间降额的参数。此外,转子材料经设计成使得在转子的操作寿命期间,在制造期间当其朝着初始裂纹尺寸生长时存在于转子中的循环裂纹生长或初始裂纹生长足够缓慢以允许成千上万的完整应力循环。

[0049] 作为一个具体实例,在一个实施例中,转子具有至少900MPa的屈服强度 $\sigma_{\text{屈服}}$ 、至少70兆帕每平方根米($\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$)的断裂韧性 $\sigma_{\text{断裂}}$ 和2毫米(mm)或更小的最大固有缺陷尺寸。

在另一个实施例中,转子具有在900 MPa与2GPa之间(包括端值)的屈服强度 $\sigma_{\text{屈服}}$ 、 $40\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 与 $200\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 之间(包括端值)的断裂韧性 $\sigma_{\text{断裂}}$ 以及在0.05mm与2mm之间(包括端值)的最大固有缺陷尺寸。在其它实施例中,转子可具有在上述范围内的任何子范围内的性质。例如,在一个实施例中,转子具有900-1000MPa、1000-1100MPa、1100-1200MPa、1200-1300MPa、1300-1400MPa、1400-1500MPa、1500-1600MPa、1600-1700MPa、1700-1800MPa、1800-1900MPa、1900-2000MPa或其子范围的任何组合的屈服强度 $\sigma_{\text{屈服}}$ 。在相同或不同的实施例中,转子具有在 $40-50\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 、 $50-60\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 、 $60-70\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 、 $70-80\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 、 $80-90\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 、 $90-100\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 、 $100-110\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 、 $110-120\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 、 $120-130\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 、 $130-140\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 、 $140-150\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 、 $150-160\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 、 $160-170\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 、 $170-180\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 、 $180-190\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 、 $190-200\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 或其子范围的任何组合之间的断裂韧性 $\sigma_{\text{断裂}}$ 。在相同或不同的实施例中,转子具有在0.5-0.6mm、0.6-0.7mm、0.7-0.8mm、0.8-0.9mm、0.9-1.0mm、1.0-1.1mm、1.1-1.2mm、1.2-1.3mm、1.3-1.4mm、1.4-1.5mm、1.5-1.6mm、1.6-1.7mm、1.7-1.8mm、1.8-1.9mm、1.9-2.0mm 或子组件的任何组合之间的最大固有缺陷尺寸。

[0050] 满足上述示例性阈值的转子可以由300M钢制成。300M钢由航空材料标准(AMS)汽车工程师协会(SAE) 6257(简称为SAE-6257)描述。300M 钢的比例化学成份具有1.6%的硅(Si)、0.82%的铬(Cr)、1.8%的镍(Ni)、0.40%的钼(Mo)、0.08%的钒(V)以及范围为0.40-0.44%的碳(C),其余为铁(Fe)。300M钢具有相对低的成本,因此有利于降低包括由该材料制成的转子的飞轮能量存储系统的成本。V和Si是合金元素,其提供改善的可硬化性,并且允许制造最大为14"厚度且完全贯通硬化的厚截面转子,例如如上所述的鱼尾形状。

[0051] 然而,仅单纯规定300M钢不足以确保上述规定的参数。附加的制造步骤用于改善转子的性能。这些步骤包括精炼、多步锻造、热处理、表面处理和机械加工。

[0052] 使用诸如真空电弧重熔("VAR")、电渣重熔("ESR")或真空感应熔炼(VIM)的精炼工艺对300M钢进行精炼。这些工艺帮助去除大于所需最大固有缺陷尺寸的缺陷。相反,如果在空气中熔化300M钢,则其将倾向于具有大于该期望最大固有缺陷尺寸的缺陷,例如夹杂物或其它杂质。VAR精炼有助于确保最大固有缺陷尺寸为2mm或更小。

[0053] 多步锻造将定向晶粒引入转子中。一般来说,晶粒取向基于所使用的锻造工艺来确定。单步锻造工艺可能不足以确保在整个转子中存在一致的方向性晶粒。执行多个锻造步骤有助于确保在整个转子中的一致的晶粒取向。控制晶粒取向还具有成形和定向存在于转子中的任何夹杂物的附加益处。

[0054] 一般来说,使用热处理来提高钢的屈服强度和硬度。在热处理中,钢被加热(或奥氏体化)成奥氏体。加热的时间和温度部分地限定了转子的晶粒尺寸。然后将奥氏体快速冷却(或淬火)。淬火将奥氏体转变为钢的几种其它材料相中的一种,例如珠光体和马氏体。由于热传递的物理性质,不是钢中的所有深度都将以相同的速率冷却,这意味着钢的较浅深度将通常淬火成相当大比例的马氏体(例如,大于50%的马氏体),而较深的深度的钢可淬火成显着比例的珠光体或其它材料相,其中只有少数钢淬火成马氏体(例如,小于50%的马氏体)。钢淬火成的各种材料相的比例由材料的过渡曲线(称为TTT曲线)控制。特别地,马氏体适合用于转子,因为它具有非常高的屈服强度和非常高的硬度。当钢在每个厚度处含有至少 50%的马氏体时,该片钢可以说成被贯通硬化。

[0055] 在一个实施例中,在转子中使用VAR 300M钢,因为它可以将300M 钢贯通硬化到8-

14英寸的深度,使得其非常适用于形成足够尺寸的转子以存储大量的动能。具体来说,300M中的Si和V合金元素在淬火期间延迟珠光体的形成,有利于过渡到马氏体,导致在钢中显着深度处的贯通硬度增加。在VAR 300M转子中,贯通硬化允许转子实现高达2GPa的屈服强度 $\sigma_{\text{屈服}}$ 。

[0056] 淬火钢具有具有低断裂韧性的缺点。因此,淬火步骤之后可以是回火步骤。回火维持钢在低于奥氏体化温度(例如,600–1200华氏($^{\circ}\text{F}$))的温度下一段时间(例如几个小时),然后缓慢地冷却回到室温。以牺牲一些屈服强度 $\sigma_{\text{屈服}}$ 为代价,回火显着提高断裂韧性,并消除残余内应力。在VAR 300M转子中,回火允许转子实现至少 $70\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 的断裂韧性 $\sigma_{\text{断裂}}$,同时还保持超过900MPa的 $\sigma_{\text{屈服}}$ 。

[0057] 表面处理保护转子的表面。可以使用几种不同的表面处理。第一种是喷丸硬化,其中压缩应力被赋予到转子的表面以使其硬化。第二种是氮和/或碳处理,其类似地增加了转子表面的硬度以及屈服强度。也可以使用其它表面处理。

[0058] 如上所述构造的转子的一个优点是相对于其它可能想到的过程,可以以低成本制造明显更大的转子,其能够存储几十到几百kWh的能量。此外,包括此类转子的飞轮系统的总成本相对于使用许多较小转子的现有飞轮系统也降低。这是由于使用大转子减少了对多个转子及其相关联的支撑元件的需要的事实。例如,对于飞轮系统使用更大的轴承来支撑更大的转子相对于使用各自使用其自己的更小的轴承的许多更小的转子更便宜。此外,单个整体式转子通常也比由单独的转子部件的堆叠组装的转子更经济。

[0059] IV. 制造方法

[0060] 图4是根据一个实施例的用于制造转子的示例性过程。在图4的实例中,元素被合金化401以制造具有所需材料组成的钢。例如,如果使用300M,则Si、Cr、Ni、Mo、V、C和Fe被合金化在一起。然后将合金化元素精炼403以除去大的缺陷。继续上述实例,VAR工艺可用于精炼300M合金。然后使用多步骤工艺将精炼的合金锻造405至接近净形状,以定向晶粒尺寸和方向。热处理被施加407以使锻造的转子材料贯通硬化,以提高屈服强度。然后执行回火409以提高断裂韧性。然后可以对转子材料进行机械加工411,以将转子形成为期望的形状。

[0061] 在阅读本公开后,本领域技术人员将通过本文公开的原理认识到另外的替代结构和功能设计。因此,虽然已经示出和描述了特定实施例和应用,但是应当理解,所公开的实施例不限于本文公开的精确结构和组件。在不脱离所附权利要求中限定的精神和范围的情况下,可以对本文公开的方法和装置的布置、操作和细节做出对本领域技术人员将显而易见的各种修改、改变和变化。

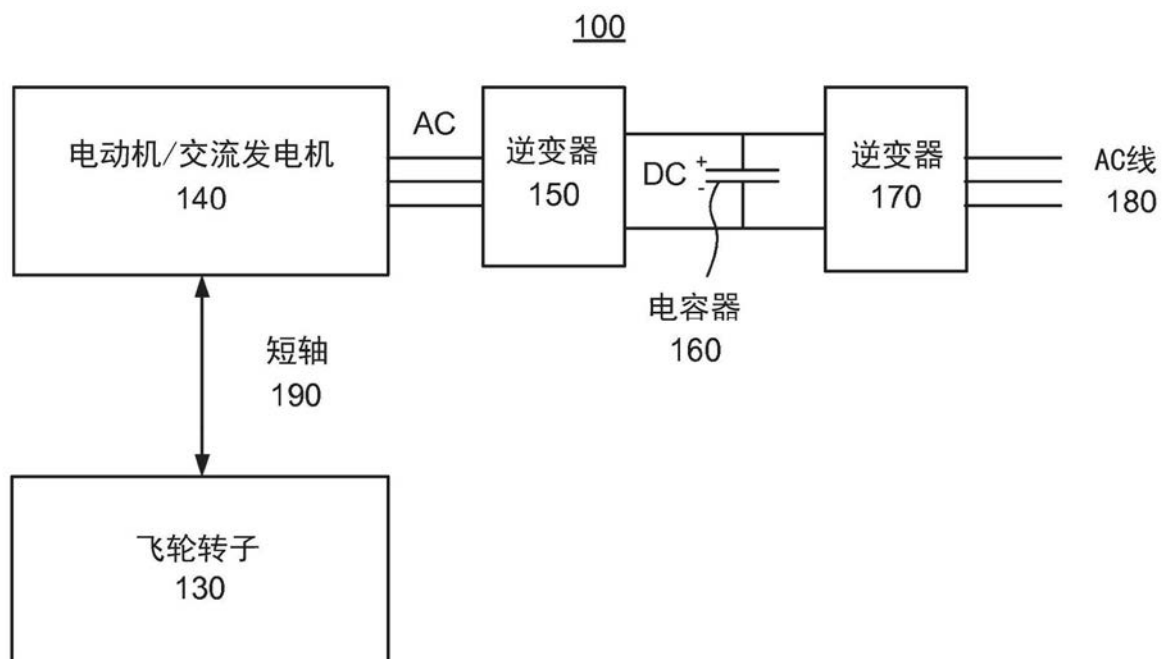


图1

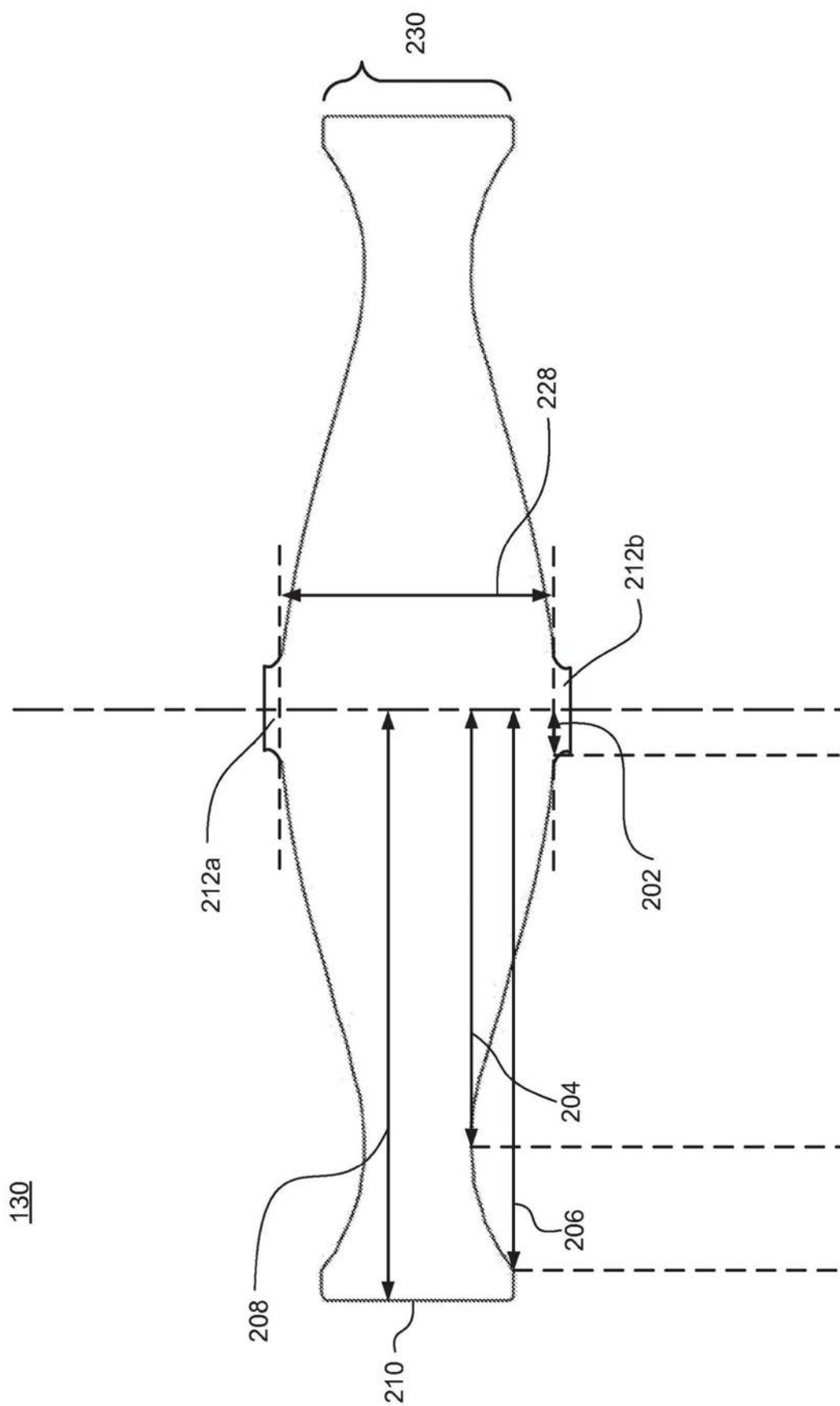


图2

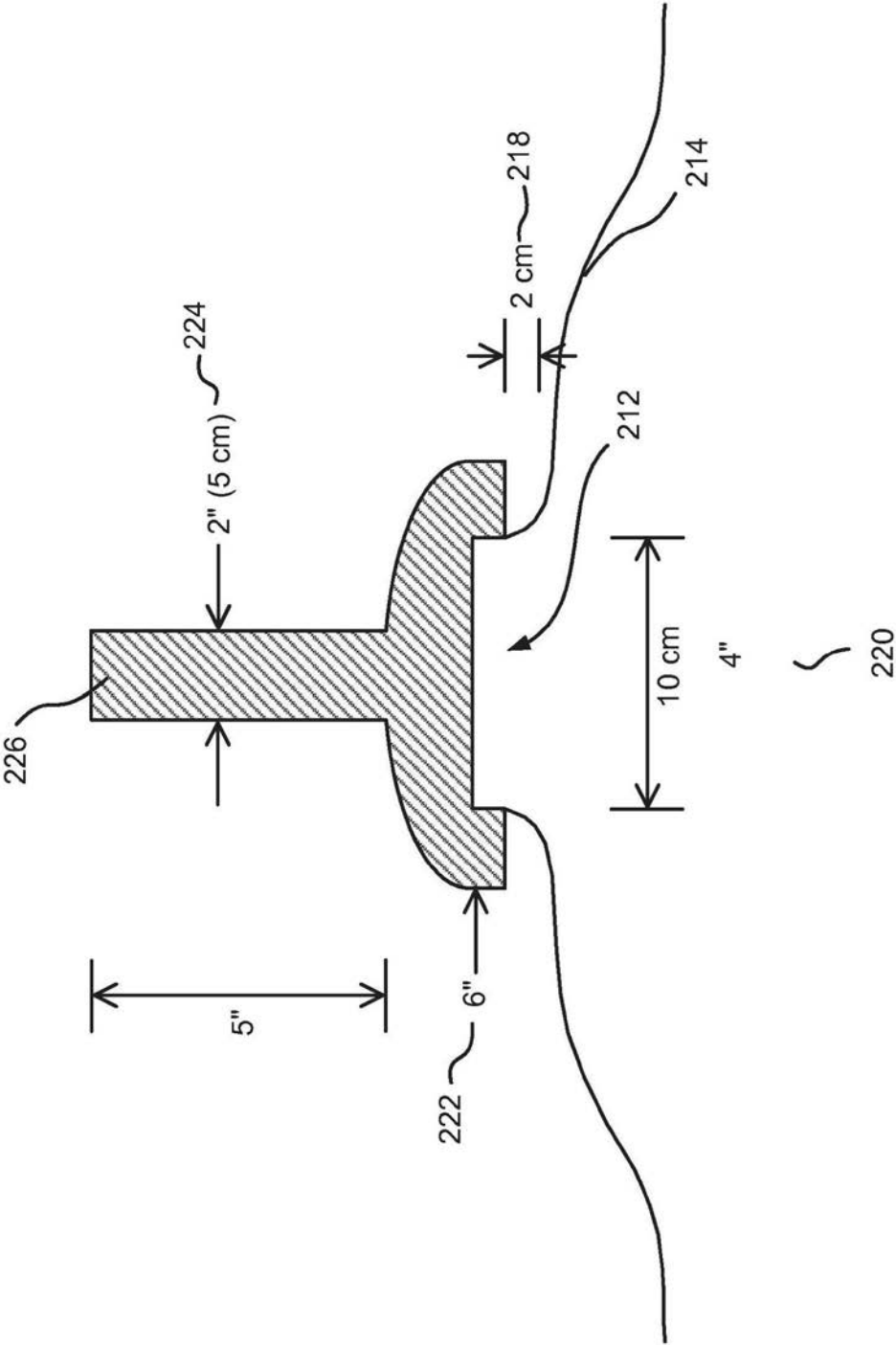


图3

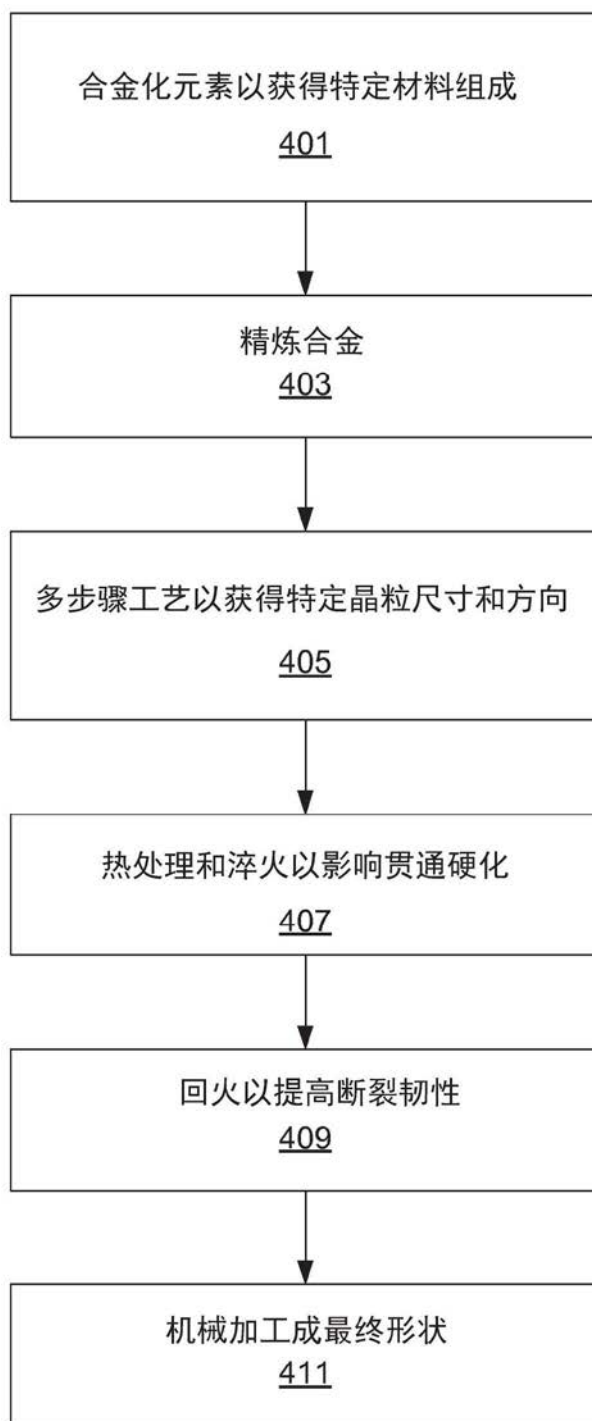


图4