



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 112969570 A

(43) 申请公布日 2021.06.15

(21) 申请号 201980071928.X

(22) 申请日 2019.10.30

(30) 优先权数据

1860029 2018.10.30 FR

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2021.04.29

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/EP2019/079748 2019.10.30

(87) PCT国际申请的公布数据

WO2020/089345 FR 2020.05.07

(71) 申请人 赛峰飞机发动机公司

地址 法国巴黎

(72) 发明人 托马斯·阿兰·德·盖拉德

吉勒斯·皮埃尔-玛丽·诺塔里安

弗雷德里克·简-伯纳德·普扎杜

(74) 专利代理机构 北京派特恩知识产权代理有限公司 11270

代理人 李雪 姚开丽

(51) Int.Cl.

B29C 70/88 (2006.01)

B29C 70/24 (2006.01)

B64C 11/20 (2006.01)

D03D 25/00 (2006.01)

F01D 5/28 (2006.01)

B29L 31/08 (2006.01)

B29D 99/00 (2006.01)

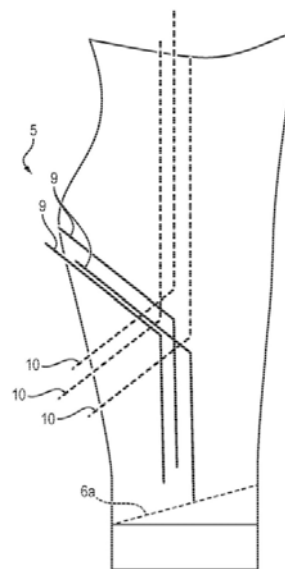
权利要求书2页 说明书6页 附图4页

(54) 发明名称

叶片的纤维增强体的纤维的杂化

(57) 摘要

本发明涉及一种涡轮机的风扇(1)的叶片(3),该叶片具有由复合材料制成的结构,该复合材料包括通过三维编织获得的纤维增强体(5)和纤维增强体(5)嵌入其中的基体,纤维增强体(5)包括具有预定断裂伸长率的第一股线(9),纤维增强体(5)的一部分进一步包括第二股线(10),该第二股线具有比第一股线(9)的断裂伸长率高的断裂伸长率。



1. 一种燃气涡轮发动机的风扇(1)的叶片(3),所述叶片包括复合材料结构,所述复合材料结构包括通过三维编织获得的纤维增强体(5)和所述纤维增强体(5)嵌入其中的基体,所述纤维增强体(5)包括具有预定断裂伸长率的第一股线(9),所述叶片(3)进一步包括根部(6)和尖端(8),所述纤维增强体(5)包括第一部分(11)和第二部分(12),所述第一部分包括所述根部(6),并且所述第二部分包括所述尖端(8),

所述叶片(3)的特征在于,所述纤维增强体(5)的一部分进一步包括第二股线(10),所述第二股线具有比所述第一股线(9)的断裂伸长率高的断裂伸长率,并且所述第一部分(11)不包括第二股线,而所述第二部分(12)包括所述第二股线(10)。

2. 根据权利要求1所述的叶片(3),其中,所述第二部分(12)包括经股线和纬股线,所述第二部分(12)的经股线和/或纬股线不包括第一股线(9)。

3. 根据权利要求1或2所述的叶片(3),其中,所述第一部分(11)延伸等于所述叶片(3)的高度(h)的至少30%的距离,例如介于所述叶片(3)的高度(h)的30%至65%之间的距离。

4. 根据权利要求1至3中的一项所述的叶片(3),其中,所述纤维增强体(5)包括在所述第一部分(11)和所述第二部分(12)之间延伸的第三部分(13),在所述第三部分(13)中,所述第二股线(10)的密度从所述第一部分(11)向所述第二部分(12)逐渐增加。

5. 根据权利要求4所述的叶片(3),其中,所述第三部分(13)延伸介于所述叶片(3)的高度(h)的5%至30%之间的距离(h3)。

6. 根据权利要求4或5所述的叶片(3),其中,所述第三部分(13)延伸介于1cm至10cm之间的距离(h3)。

7. 根据权利要求4至6中的一项所述的叶片(3),其中,所述纤维增强体(5)通过对经股线和纬股线进行三维编织而获得,所述经股线限定了多个经平面(C1-C4),所述纤维增强体(5)的每个经平面(C1-C4)通过一行纬股线(L1-L12)而与紧邻的经平面(C1-C4)分隔开,在两个紧邻的经平面(C1-C4)之间,对所述第三部分的至多30%的经股线和/或纬股线进行改变。

8. 根据权利要求7所述的叶片(3),其中,在两个紧邻的经平面(C1-C4)之间,对所述第三部分的5%至15%的经股线和/或纬股线进行改变。

9. 根据权利要求1至8中的一项所述的叶片(3),其中,所述第一股线(9)具有比所述第二股线(10)的杨氏模量高的杨氏模量。

10. 根据权利要求1至9中的一项所述的叶片(3),其中,所述第二股线(10)的断裂伸长率是所述第一股线(9)的断裂伸长率的1.5倍至3倍。

11. 根据权利要求1至10中的一项所述的叶片(3),其中,所述第一股线(9)包括杨氏模量大于250GPa且断裂伸长率介于1.5%至2.5%之间的碳纤维或芳族聚酰胺纤维。

12. 根据权利要求1至11中的一项所述的叶片(3),其中,所述第二股线(10)的断裂伸长率介于3%至6%之间,优选地4%至5%之间。

13. 根据权利要求12所述的叶片(3),其中,所述第二股线(10)包括玻璃纤维或芳族聚酰胺纤维或玄武岩纤维。

14. 根据权利要求1至13中的一项所述的叶片(3),其中,所述第二股线(10)包括经线和/或纬线。

15. 一种用于燃气涡轮发动机的风扇(1),所述风扇包括多个根据权利要求1至14中的

一项所述的叶片(3)。

## 叶片的纤维增强体的纤维的杂化

### 技术领域

[0001] 本发明总体上涉及燃气涡轮发动机领域,并且更具体地涉及这些燃气涡轮发动机的风扇叶片及其制造方法的领域。

[0002] 本发明特别适用于由复合材料制成的风扇叶片及其与主管道的入口的相互作用。

### 背景技术

[0003] 燃气涡轮发动机叶片,特别是风扇叶片会承受很大的机械应力和热应力,并且必须满足严格的重量和空间要求。因此,已经提出使用由复合材料制成的叶片,该复合材料包括用聚合物基体致密化的纤维增强体,这样的叶片比具有等效推进特性的金属叶片更轻并且具有令人满意的耐热性。

[0004] 在发动机的认证和使用寿命期间,风扇叶片会经受鸟和冰雹吸入。然而,取决于撞击叶片的物体类型(尤其是物体尺寸、质量)和风扇的类型(转速和叶片数量),引起和传播损坏的优先部位不同。因此,在叶片的设计阶段中优化风扇叶片的机械行为,以符合认证规则。

[0005] 此外,当前的设计趋向于减小在叶片的前缘部位、后缘部位或实际上整个结构中的复合材料结构的厚度,以改善空气动力学性能。因此,在等量材料和等量堆积定律下,叶片抵抗撞击的能力会相应降低。

### 发明内容

[0006] 因此,本发明的目的是通过提出一种具有改善的吸入行为的用于燃气涡轮发动机的风扇叶片来弥补上述缺点。

[0007] 为此,本发明提出了一种用于燃气涡轮发动机的风扇叶片,该风扇叶片包括复合材料结构,该复合材料结构包括通过三维编织获得的纤维增强体和纤维增强体嵌入其中的基体,该纤维增强体包括具有预定断裂伸长率的第一股线。

[0008] 此外,纤维增强体的一部分进一步包括第二股线,该第二股线具有比第一股线的断裂伸长率高的断裂伸长率。

[0009] 上述叶片的一些优选但非限制性的特征为以下被单独地采用或结合地采用的特征:

[0010] 叶片进一步包括根部和尖端,纤维增强体包括第一部分和第二部分,该第一部分包括根部,并且该第二部分包括尖端,第一部分不包括第二股线,而第二部分包括第二股线。

[0011] 第二部分包括经股线(warp strands)和纬股线(weft strands),所述第二部分的经股线和/或纬股线不包括第一股线。

[0012] 所述第一部分延伸等于叶片高度的至少30%的距离,例如介于所述叶片高度的30%至65%之间的距离。

[0013] 纤维增强体包括在第一部分和第二部分之间延伸的第三部分,在第三部分中第二

股线的密度从第一部分到第二部分逐渐增加。

[0014] 第三部分延伸介于叶片高度的5%至30%之间的距离。

[0015] 第三部分延伸介于1cm至10cm之间的距离。

[0016] 纤维增强体通过对经股线和纬股线进行三维编织而获得,所述经股线限定了多个经平面(warp plane),纤维增强体的每个经平面通过一行纬股线而与紧邻的经平面分隔开,在两个紧邻的经平面之间,对第三部分的至多30%的经股线和/或纬股线进行改变。

[0017] 在两个紧邻的经平面之间,对第三部分的5%至15%的经股线和/或纬股线进行改变。

[0018] 第一股线具有比第二股线高的杨氏模量。

[0019] 第二股线的断裂伸长率是第一股线的断裂伸长率的1.5倍至3倍。

[0020] 第一股线包括杨氏模量大于250GPa且断裂伸长率介于1.5%至2.5%之间的碳纤维或芳族聚酰胺纤维。

[0021] 第二股线的断裂伸长率介于3%至6%之间,优选介于4%至5%之间。

[0022] 第二股线包括玻璃纤维或芳族聚酰胺纤维或玄武岩纤维。

[0023] 第二股线包括经线和/或纬线。

[0024] 根据第二方面,本发明还提供一种用于燃气涡轮发动机的风扇,该风扇包括多个如上所述的叶片。

### 附图说明

[0025] 通过阅读以下详细描述并参照以非限制性示例的方式给出的附图,本发明的其他特征、目的和优点将更加清楚地显现,在附图中:

[0026] 图1是表示用于根据实施例的风扇叶片的纤维增强体的示例的示意图,其中已经示意了在中间部分中引入第二股线并移出第一股线。

[0027] 图2是表示用于风扇叶片的纤维增强体的示例的示意图,其中已经示意了叶片的纤维增强体的纬股线和四个经平面。

[0028] 图2a至图2d示意性地示出了图2中所示的四个经平面。

[0029] 图2e示意性地示出了图2的纤维增强体的局部纬平面(weft plane)。

[0030] 图3是包括根据本发明的叶片的风扇的示例性实施例的透视图。

### 具体实施方式

[0031] 在本申请中,上游和下游是相对于风扇1中气体穿过燃气涡轮发动机的正常流动方向限定的。此外,将风扇1的旋转轴线称为风扇1的径向对称的轴线X。轴向方向对应于风扇1的轴线X的方向,并且径向方向是垂直于该轴线并穿过该轴线的方向。最后,相对于径向方向,将会分别使用内部和外部,以使元件的内部部分或内部面比同一元件的外部部分或外部面更靠近轴线X。

[0032] 燃气涡轮发动机风扇1包括风扇盘2,该风扇盘2承载风扇1的与叶片间平台相关联的多个风扇叶片3。

[0033] 每个叶片3包括复合材料结构,该复合材料结构包括通过三维编织获得的纤维增强体5和纤维增强物5嵌入其中的基体。

[0034] 该复合材料结构包括根部6;具有前缘4的翼型件 (airfoil) 7;和尖端8;以及在根部和翼型件之间延伸的叶片柄。前缘4对应于翼型件7的被构造成面向进入风扇1的气流的边缘。

[0035] 最后,该结构由多个叶片部分形成,该多个叶片部分从根部6沿着相对于风扇1的旋转轴线X径向地延伸的堆叠轴线Z堆叠。

[0036] 每个叶片3的根部6接合在形成在风扇盘2中的轴向凹槽中。对于翼型件7,其适合于在发动机运转时延伸到气流中,将气流分成压力流和吸力流以产生提升力。叶片3的高度h对应于在根部6和尖端8之间沿着各叶片部分的堆叠轴线Z的尺寸。高度h可以例如在翼型件7的前缘4和下部边界(对应于翼型件7与叶片柄的界面,相对于前缘4部位刚好在根部上方)之间的相交处测量。特别地,高度的百分比以叶片总高度考虑,叶片总高度从前缘4的内端部(即在前缘4与布置在空气动力学管路内侧上的平台的连接处)到前缘4的位于叶片尖端的端部测量。在示出预成型件的图2中,平台位置由虚线表示并由附图标记6a标记。

[0037] 纤维增强体5可以由单件纤维预成型件形成,该单件纤维预成型件通过厚度渐变的三维编织或多层编织而获得。它包括尤其可以由碳、玻璃、玄武岩或芳族聚酰胺制成的纤维。而基体通常是聚合物基体,例如环氧树脂、双马来酰亚胺或聚酰亚胺。然后,通过借助于树脂传递模塑(RTM)或真空辅助树脂传递模塑(VARTM)类型的真空树脂注射工艺进行模制来形成叶片3。

[0038] 纤维增强体5包括具有预定断裂伸长率的第一股线9和具有比第一股线9的断裂伸长率高的断裂伸长率的第二股线10。因此,为了根据叶片3的不同部位和应力的类型来充分利用每根股线的机械性能,通过将构成纤维增强体的股线杂化来获得纤维增强体5。

[0039] 第一股线9优选地具有高的杨氏模量,例如大于250GPa,并且具有能够满足叶片3的设计标准,特别是叶片3的频率状态的功能。因此,在纤维增强体5的编织过程中使用这些第一股线9来形成增强体5的包括叶片3的根部6和翼型件7的下部部分的部分(或内部部分11),增强体5的该部分至少对应于叶片3的下部的且较厚的部分,使得叶片3的固有频率较高。因此,这使得可以限制或至少移开叶片3的第一能量正常模式与电动机谐波之间的频率交叉。在这里,下部的且较厚的部分包括叶片3的根部6和翼型件7的下部部分。在一个实施例中,在编织内部部分11时仅将第一股线9用作经线和纬线。

[0040] 对于第二股线10,其断裂强度大于第一股线9的断裂强度,其功能是限制在吸入物体,特别是吸入鸟时引起和传播对叶片3的损坏。因此,在纤维增强体5的编织过程中使用这些第二股线10来形成增强体5的包括尖端8的部分(或外部部分12)。优选地,第二股线10的断裂伸长率介于第一股线9的断裂伸长率的1.5倍至3倍之间。在一个实施例中,在编织外部部分12时仅将第二股线10用作经线和纬线。

[0041] 增强体5进一步包括在内部部分11和外部部分12之间延伸的中间部分13,该中间部分13由第一股线9和第二股线10这两者形成。在一个实施例中,在编织中间部分13时,仅将第一股线9和第二股线10用作经线和纬线。

[0042] 该中间部分13被构造成用作第一部分11与第二部分12之间的界面,以限制由于材料不连续而引起的脆性。当纤维增强体5在叶片3的第一部分11中仅包括第一股线9,并且在叶片3的第二部分12中仅包括第二股线10,以及在增强体5中第一部分11和第二部分12是首尾相连时,所得的叶片3能有效地防止在包括第二股线10的部位中对叶片3造成损坏。然而,

申请人意识到,在不存在中间部分13,即在纤维增强体5的第一部分11和第二部分12之间的界面处突然引入第二股线10并且同时去除第一股线9的情况下,所获得的叶片3万一受到撞击就会有在该界面处遭受严重损坏的风险,原因是增强体5的两个部分11、12之间的界面由于材料性质的显著不连续性而被削弱。

[0043] 因此,中间部分13提供内部部分11的材料性质和外部部分12的材料性质之间的过渡。为此,在中间部分13内将第二股线10的密度从内部部分11到外部部分12逐渐增加。更精确地,在内部部分11与中间部分13之间的界面14处,第二股线10的密度非常低,而第一股线9的密度非常高。相反,在中间部分13与外部部分12之间的界面15处,第二股线10的密度非常高,而第一股线9的密度非常低。

[0044] 图1和图2示意性地示出了叶片3,在进行树脂注射,或通过基体致密化并进行可能的机械加工之前,该叶片3的纤维增强体5已经由三维编织的纤维预成型件成形,以获得根据本发明的由复合材料制成的风扇1叶片3。三维编织是指经线顺着正弦路径,以便使属于不同纬线层的纬线相互联接,但解绑定(unbinding)除外,要注意的是,三维编织,尤其是采用双罗纹编织的三维编织可以在表面上包括2D编织。可以使用不同的三维编织,诸如双罗纹编织、多缎纹或多片编织,例如特别是在文献W0 2006/136755中所描述的。

[0045] 为了一体地生产内部部分11、中间部分13和外部部分12,可以在进行注射之前在中间部分13的不同经平面处从预成型编织物中相继地取出第一股线9,并且在预成型件表面处切割,同时将第二股线10逐渐引入到这些经平面中(参见图1)。

[0046] 在图2中已经示出了经平面C1、C2、C3、C4的四个示例。经平面C1-C4是纤维预成型件沿着垂直于堆叠轴线Z的平面的截面图。在纤维增强体5中,每个经平面C1至C4通过一行纬股线(a line of weft strands)与紧邻的经平面分隔开。在图2中,已示出的经平面C1至C4被三行纬股线(L3至L11)成对地间隔开。

[0047] 此外,图2a至图2d各自示出了这四个经平面C1-C4中的一个,其中仅示出了经股线(即在各部分的堆叠方向上),而省略了纬股线以简化附图的阅读。这些图示意性地示出了股线杂化的第一示例,其中第二股线10被插入在经平面中。

[0048] 如在图2a中可以看到,作为纤维增强体5的内部部分11的一部分的第一经平面C1仅包括第一股线9。该第一经平面C1位于与增强体5的中间部分13的界面14处。

[0049] 第二经平面C2(图2b)是纤维增强体5的中间部分13的一部分,位于中间部分13与内部部分11的界面14附近。该第二经平面C2包括为第二股线10的两倍之多的第一股线9。

[0050] 第三经平面C3(图2c)是纤维增强体5的中间部分13的一部分,位于中间部分13与外部部分12的界面15附近。该第三经平面C3包括为第一股线9的两倍之多的第二股线10。

[0051] 第四经平面C4(图2d)是纤维增强体5的外部部分12的一部分,位于与中间部分13的界面15处,并且仅包括第二股线10。

[0052] 图2e中示出了股线杂化的第二实例,其中第二股线10插入在纬平面中。纬平面是纤维预成型件沿着包括堆叠轴线Z并且与风扇1的旋转轴线X基本上对准的平面的截面图。在这里,纬平面包括在片材中。纬平面由多行纬股线L1-L12形成,每行纬股线通过经平面(此这里示出了平面C1-C4)而与紧邻行的纬股线分隔开。应当注意,类似于图2a至图2d,在图2e中仅示出了纬股线(即沿基本上轴向的方向),其中省略了经股线以简化附图的阅读。

[0053] 如在图2e中可以看到,作为纤维增强体5的内部部分11的一部分的前两行纬股

线L1和L2仅包括第一股线9。这前两行纬股线L1、L2位于与增强体5的中间部分13的界面14处。

[0054] 第三行纬股线L3是纤维增强体5的中间部分13的一部分,位于中间部分13与内部部分11的界面14附近。该第三行纬股线L3包括单条第二股线。后续行的纬股线L4-L10各自都比紧邻的前一行纬股线多一条第二股线,直到第十一行纬股线和纬股线L11的后续一行,其中,第十一行纬股线和纬股线L11的后续一行仅包括第二股线10,并由此形成增强体5的外部部分12的一部分。

[0055] 通常,为了确保增强体5的内部部分11和外部部分12之间的机械性能的过渡,在两个紧邻的经平面(即仅由一行纬股线T分隔开)之间优选对至多30%的经股线和/或纬股线进行改变。因此,在两个连续的经平面之间,从形成纤维增强体5的纤维预成型件中取出至多30%的第一股线9并在表面处切割,并且将一样多的第二股线10从表面引入到纤维预成型件中,以便替代所取出的第一股线9,而不管所取出的第一股线9是经股线还是纬股线。优选地,在两个紧邻的平面之间对5%至15%的股线进行改变。应当注意,在一个实施例中,在中间部分13的两个连续的经平面之间,经股线和纬股线都可以被替换。因此,这等于将上述第一实施例和第二实施例结合。

[0056] 中间部分13的高度 $h_3$ (界面14和界面15之间沿着堆叠轴线Z的距离)根据叶片3的尺寸来确定,更特别地根据所选择的频率策略/吸入尺寸的组合来确定。

[0057] 通常,内部部分11从叶片3的根部延伸等于叶片3的高度 $h$ 的至少30%的距离,使得叶片3的厚的部位足够刚硬(由于第一股线9的高杨氏模量和低断裂伸长率)以保证符合叶片3的设计标准,特别是频率状态。

[0058] 如果叶片3的刚度允许,则内部部分11和中间部分13之间的界面14可以定位在介于叶片3的高度 $h$ 的30%至65%之间的距离 $h_1$ (沿着堆叠轴线Z,从翼型件7的下部边界测量)处。第二股线10的引入则使得可以改善叶片3抵抗重型鸟的撞击(与这些鸟的吸入有关的撞击和损坏的集中部位位于距叶片3的根部一定距离处,该距离介于叶片3的高度 $h$ 的30%至70%之间)的行为,而且也改善抵抗中型鸟的撞击的行为。最严重的损坏是在叶片3的介于叶片3的高度 $h$ 的70%至100%之间的距离延伸的部位中。

[0059] 另一方面,当频率或振动方面需要在叶片3中保持一定的刚度时,叶片根部与界面14之间的距离 $h_1$ 可以大于叶片3的高度 $h$ 的65%,其中,从该界面14处将第二股线10引入到纤维增强体5中。从大于叶片3的高度 $h$ 的65%的距离 $h_1$ 开始,将第二股线10引入到叶片3的上部部分中减小了叶片3的刚度。然而,刚度的这种降低对叶片3的固有频率和叶片3在尖端8处的偏差仅具有轻微影响。另一方面,由于第二股线10的断裂伸长率,这提高了对中型和轻型鸟撞击的抵抗性。

[0060] 由此可见,叶片3的尺寸使得可以确定内部部分11和中间部分13之间的界面14的位置,并且更精确地是可以确定将第二股线10引入到纤维增强体中的距离 $h_1$ ,从而使得可以将频率状态所需的刚度(第一股线9)和抵抗吸入所需的断裂伸长率(第二股线10)组合。

[0061] 中间部分13的高度 $h_3$ 介于叶片3的高度 $h$ 的5%至30%之间。因此,中间部分13的高度 $h_3$ 可以在1cm至10cm之间。中间部分13的高度 $h_3$ 可以根据经平面之间的间距和两个连续的经平面之间的股线改变百分比来确定。例如,在两个经平面之间的间距 $E$ 等于3mm,并且两个经平面之间的股线改变百分比 $P$ 等于10%时,高度 $h_3$ 可以定义如下:



[0062]  $h_3 = E/P = 30\text{mm}$ 。

[0063] 在一个实施例中,第一股线9具有高的杨氏模量E,即大于250GPa,优选地大于270GPa。它们的断裂伸长率A也在1.5%和2.5%之间。

[0064] 例如,第一股线9可以包括碳纤维,典型地HS\*T300 ( $E = 284\text{GPa}$ ,  $A = 1.5\%$ )、HS TR30S ( $E = 356\text{GPa}$ ,  $A = 1.9\%$ )或HS T700 ( $E = 395\text{GPa}$ ,  $A = 2.1\%$ )碳纤维;或Dupont Kevlar 49型高模量芳族聚酰胺纤维 ( $E = 302$ ,  $A = 2.4\%$ )。

[0065] 那么,第二股线10的断裂伸长率可以介于3%至6%之间,优选地介于4%至5%之间。例如,第二股线10可包括玻璃纤维,典型地E-GLASS型玻璃纤维 ( $E = 165\text{GPa}$ ,  $A = 4.4\%$ )或S-2GLASS型玻璃纤维 ( $E = 267\text{GPa}$ ,  $A = 5.2\%$ );或玄武岩纤维 ( $E = 227\text{GPa}$ ,  $A = 3\%$ );或聚酯纤维 ( $E = 268$ ,  $A = 3.5\%$ )。

[0066] 通常,所描述的构造对于其风扇的外径可以为约1.8m至3m的发动机是有效的。风扇叶片的数量可以等于16或18。无论风扇直径如何,都将尽可能减少风扇叶片的数量。在各种标准中,参数的选择(特别是距离 $h_1$ )将更特别是取决于风扇叶片的行为和“吸入频率/尺寸”的组合。实际上,对于相同的发动机目标,可以在不同的吸入情况下选择不同的频率行为或频率响应的策略,例如以通过避免与发动机的能量谐波发生振动交叉来延后叶片和叶栅(blading)响应。例如,可以做出选择以便将这些交叉点定位在瞬态发动机速度下。

[0067] 由于对机械强度的额外贡献,纤维增强体5的股线杂化也开辟了设计领域。例如,与仅包括第一股线9(具有高的杨氏模量)的叶片3相比,细化叶片3在前缘4或后缘处或在其整个高度h范围内的轮廓成为可能,这使得能够优化叶片3的质量和风扇1的空气动力学性能(通过获得更薄的轮廓或通过减小轮毂比,这与叶片3的质量所引起的离心力的减小相关)。

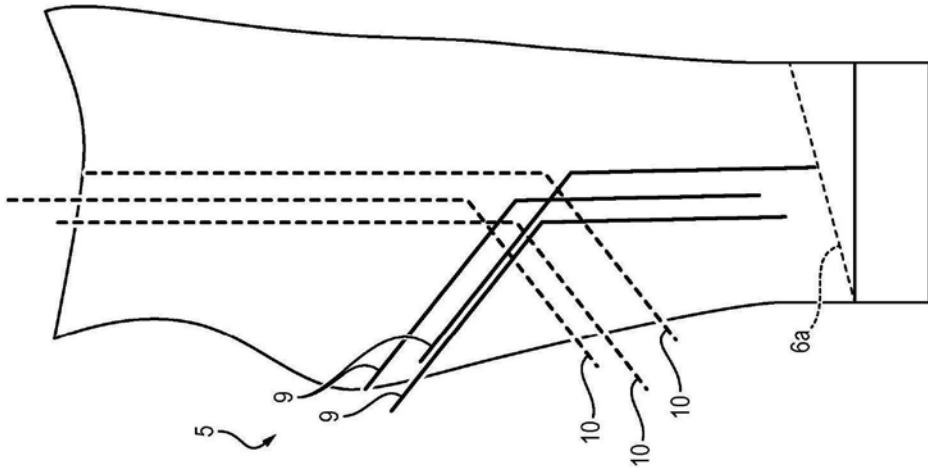


图1

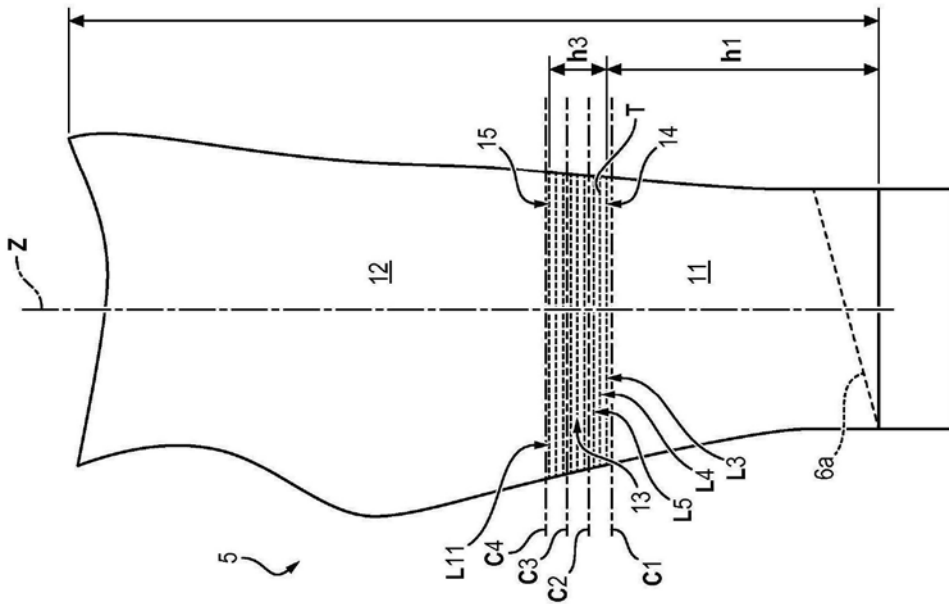


图2

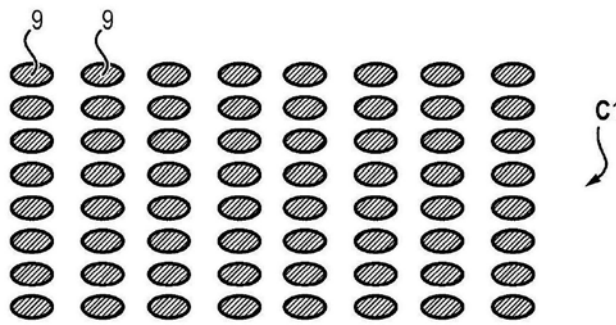


图2a

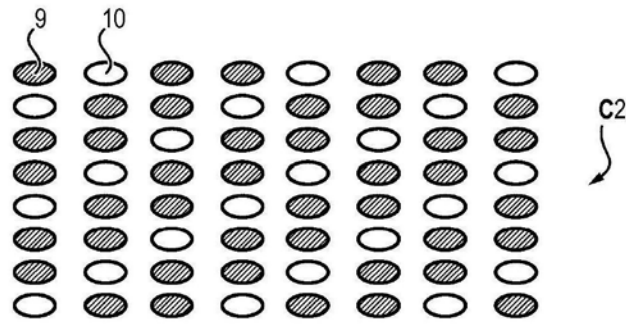


图2b

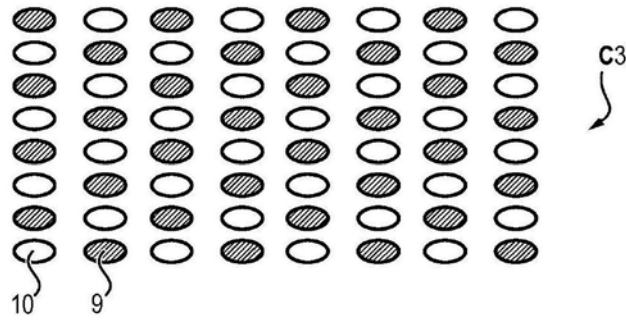


图2c

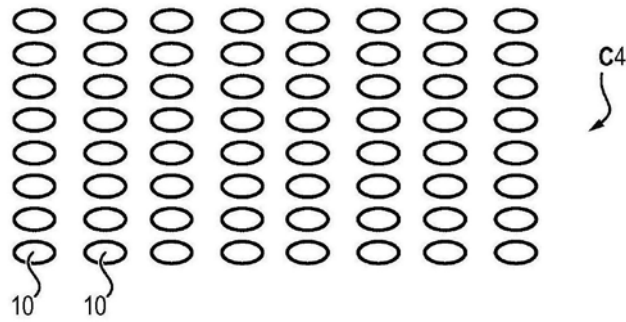


图2d

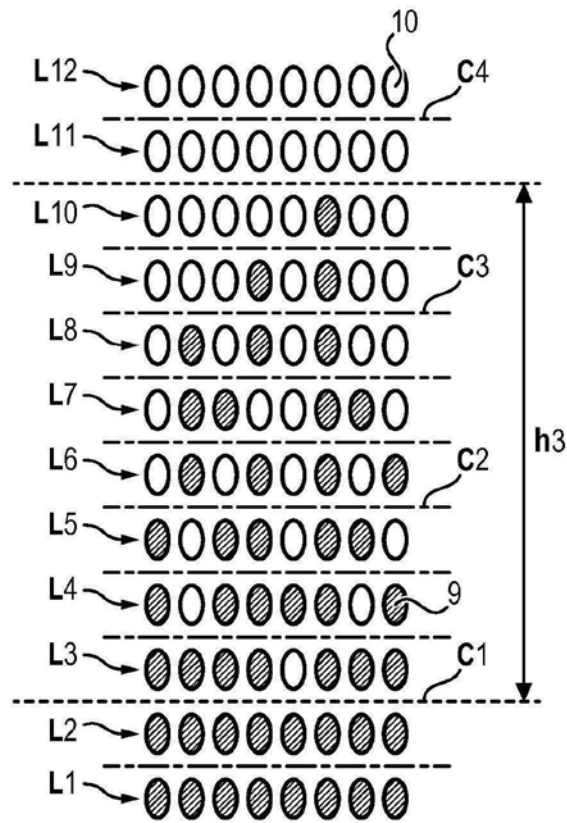


图2e

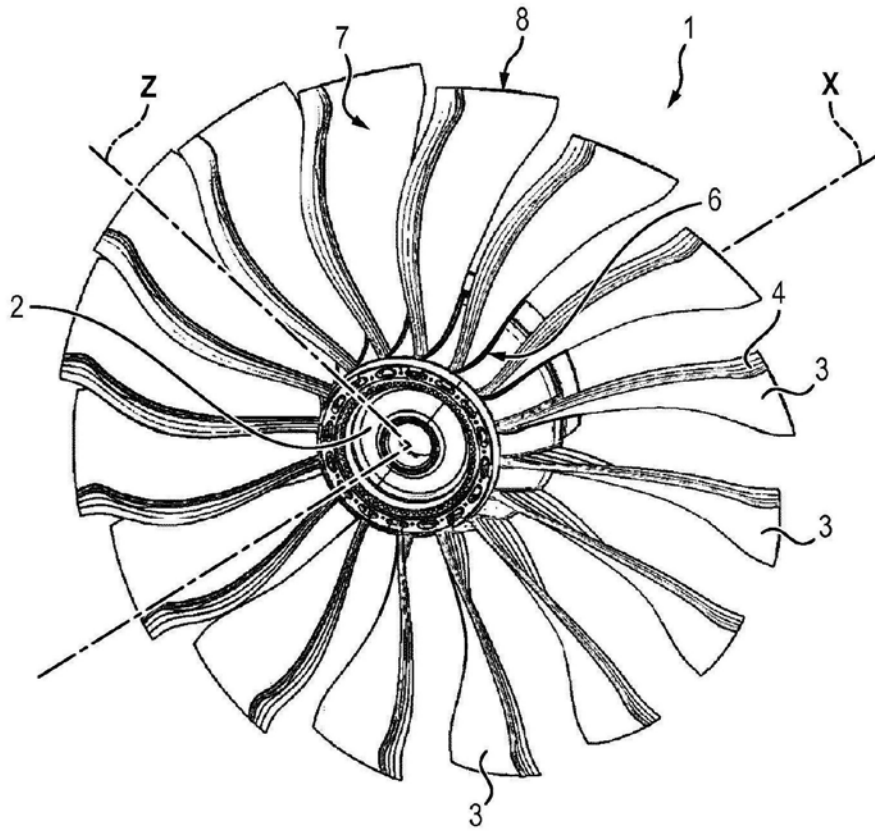


图3