



## (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 108367329 B

(45) 授权公告日 2021.04.09

(21) 申请号 201680012297.0

专利权人 西门子加拿大有限公司

(22) 申请日 2016.01.09

(72) 发明人 克里斯托弗·布斯-莫里森

(65) 同一申请的已公布的文献号

迈赫兰·法翰吉

申请公布号 CN 108367329 A

马修·克里斯托弗·英尼斯

(43) 申请公布日 2018.08.03

梅根·斯查恩泽 阿里·莎尼恩

(30) 优先权数据

法拉德·加玮德 卡蒂亚·伯托蒂

62/101,840 2015.01.09 US

(74) 专利代理机构 北京英赛嘉华知识产权代理

62/118,826 2015.02.20 US

有限责任公司 11204

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

代理人 王达佐 洪欣

2017.08.25

(51) Int.Cl.

(86) PCT国际申请的申请数据

B21D 28/24 (2006.01)

PCT/US2016/012769 2016.01.09

B32B 38/04 (2006.01)

(87) PCT国际申请的公布数据

B29C 55/02 (2006.01)

W02016/112368 EN 2016.07.14

B32B 3/10 (2006.01)

(73) 专利权人 哈佛大学校董委员会

B32B 3/24 (2006.01)

地址 美国马萨诸塞州

审查员 李静

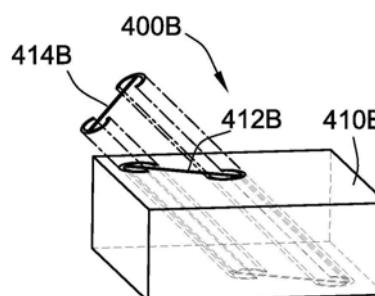
权利要求书3页 说明书8页 附图7页

### (54) 发明名称

用于自定义NPR特性和改善的冷却性能的以工程化图案具有成角度的狭槽的拉胀结构

### (57) 摘要

公开了拉胀结构、泻流冷却拉胀片、具有拉胀结构的系统和装置,以及使用拉胀结构的方法和制备拉胀结构的方法。公开了包括具有相对的顶表面和底表面的弹性刚体的拉胀结构。第一多个细长孔和第二多个细长孔从所述顶表面至所述底表面延伸穿过所述弹性刚体。所述第一多个细长孔相对于所述第二多个细长孔横向延伸。所述第一多个细长孔和/或所述第二多个细长孔与所述弹性刚体的顶表面倾斜成角度。所述细长孔协同配置以提供期望的冷却性能,同时在宏观平面载荷条件下通过负泊松比(NPR)特性表现出应力减小。例如,所述拉胀结构可以表现出约30至50%的泻流冷却效果和约-0.2%至-0.9%的泊松比。



1. 拉胀结构, 包含:

弹性刚体, 其具有相对的顶表面和底表面以及从所述顶表面至所述底表面延伸穿过所述弹性刚体的第一多个细长孔和第二多个细长孔, 所述第一多个细长孔相对于所述第二多个细长孔横向延伸, 至少所述第一多个细长孔与所述弹性刚体的顶表面倾斜成角度, 所述第一多个细长孔中的各个细长孔具有在所述顶表面上偏移的原始形状, 所述原始形状与所述顶表面倾斜成角度以实现所述细长孔的失真形状, 所述失真形状是在所述顶表面上的轮廓形式,

其中所述第一多个细长孔和所述第二多个细长孔协同配置以提供期望的冷却性能并且在宏观平面载荷条件下通过负泊松比 (NPR) 特性表现出期望的应力性能, 所述第一多个细长孔和所述第二多个细长孔中的各个细长孔具有其中长轴大于短轴的非圆形状。

2. 如权利要求1所述的拉胀结构, 其中所述第二多个细长孔与所述弹性刚体的顶表面倾斜成角度。

3. 如权利要求1所述的拉胀结构, 其中所述冷却性能包括30%至50%的泻流冷却效果 (Eta), 其中所述30%至50%的泻流冷却效果 (Eta) 定义为:

$$\text{Eta} = (T_{\text{热气}} - T_{\text{壁}}) / (T_{\text{热气}} - T_{\text{冷却剂}})$$

$T_{\text{热气}}$  为热气温度,  $T_{\text{壁}}$  为壁温度,  $T_{\text{冷却剂}}$  为供应的冷却气体的温度。

4. 如权利要求1所述的拉胀结构, 其中所述细长孔被设计成具有预定孔隙率、预定图案或预定纵横比或者它们的任意组合, 以实现所述NPR特性。

5. 如权利要求1所述的拉胀结构, 其中所述细长孔的每一个具有5至40的纵横比, 其中所述纵横比是指长轴与短轴之比。

6. 如权利要求1所述的拉胀结构, 其中所述第一多个细长孔或所述第二多个细长孔或两者各自具有S形平面图轮廓。

7. 如权利要求1所述的拉胀结构, 其中所述第一多个细长孔或所述第二多个细长孔或两者各自具有椭圆形平面图轮廓。

8. 如权利要求1所述的拉胀结构, 其中所述第一多个细长孔或所述第二多个细长孔或两者各自具有Z形平面图轮廓。

9. 如权利要求1所述的拉胀结构, 其中所述第一多个细长孔或所述第二多个细长孔或两者各自具有杠铃形平面图轮廓, 所述杠铃形平面图轮廓包括通过细长狭槽连接的一对隔开的钻孔。

10. 如权利要求1所述的拉胀结构, 所述第一多个细长孔或所述第二多个细长孔或两者各自具有I形平面图轮廓, 所述I形平面图轮廓包括通过细长狭槽连接的一对隔开的半圆形狭槽。

11. 如权利要求1所述的拉胀结构, 其中所述第一多个细长孔和所述第二多个细长孔被排布成行和列的阵列。

12. 如权利要求11所述的拉胀结构, 其中所述行彼此等间隔开并且所述列彼此等间隔开。

13. 如权利要求1所述的拉胀结构, 其中各个所述细长孔具有垂直于短轴的长轴, 所述第一多个细长孔的长轴基本上垂直于所述第二多个细长孔的长轴。

14. 如权利要求1所述的拉胀结构, 其中所述角度为40度至70度。

15. 如权利要求1所述的拉胀结构,其中所述NPR特性包括-0.2%至-0.9%的泊松比。

16. 如权利要求1所述的拉胀结构,其中所述细长孔具有0.3%至9%的预定孔隙率,其中孔隙率定义为

$$A_A/A_S$$

$A_A$ 为所述第一多个细长孔和所述第二多个细长孔的表面积, $A_S$ 为所述顶表面的表面积。

17. 泻流冷却拉胀片结构,包含:

金属片,其具有相对的顶表面和底表面以及从所述顶表面至所述底表面延伸穿过所述金属片的第一多个细长孔和第二多个细长孔,所述第一多个细长孔具有第一组几何特性和第一图案,所述第二多个细长孔具有第二组几何特性和第二图案,所述第一多个细长孔相对于所述第二多个细长孔正交定向,所述第一多个细长孔和所述第二多个细长孔中的各个细长孔相对于金属片的顶表面倾斜成角度并且具有其中长轴大于短轴的非圆形状,所述第一多个细长孔和所述第二多个细长孔中的各个细长孔具有在所述顶表面上偏移的原始形状,所述原始形状与所述顶表面倾斜成角度以实现所述细长孔的失真形状,所述失真形状是在所述顶表面上的轮廓形式,

其中所述第一多个细长孔的第一几何特性和图案与所述第二多个细长孔的第二几何特性和图案协同配置以提供最小的冷却性能特性,同时在宏观平面载荷条件下表现出负泊松比(NPR)特性。

18. 制造拉胀结构的方法,所述方法包括:

提供具有相对的顶表面和底表面的弹性刚体;

向所述弹性刚体添加从所述顶表面至所述底表面延伸穿过所述弹性刚体的第一多个细长孔,将所述第一多个细长孔排布成行和列,第一多个细长孔中的各个细长孔与所述弹性刚体的顶表面倾斜成角度,各个细长孔具有在所述顶表面上偏移的原始形状,所述原始形状与所述顶表面倾斜成角度以实现所述细长孔的失真形状,所述失真形状是在所述顶表面上的轮廓形式;以及

向所述弹性刚体添加从所述顶表面至所述底表面延伸穿过所述弹性刚体的第二多个细长孔,将所述第二多个细长孔排布成行和列,所述第一多个细长孔和所述第二多个细长孔中的各个细长孔具有其中长轴大于短轴的非圆形状,

其中所述第一多个细长孔和所述第二多个细长孔协同配置以提供冷却性能,同时在宏观平面载荷条件下通过负泊松比(NPR)特性表现出应力减小。

19. 如权利要求18所述的方法,其中所述冷却性能包括30%至50%的泻流冷却效果(Eta),其中所述30%至50%的泻流冷却效果(Eta)定义为:

$$Eta = (T_{\text{热气}} - T_{\text{壁}}) / (T_{\text{热气}} - T_{\text{冷却剂}})$$

$T_{\text{热气}}$ 为热气体温度, $T_{\text{壁}}$ 为壁温度, $T_{\text{冷却剂}}$ 为供应的冷却气体的温度。

20. 如权利要求18所述的方法,其中将所述细长孔设计成具有预定孔隙率、预定图案或预定纵横比或者它们的任意组合,以实现所述NPR特性。

21. 如权利要求18所述的方法,其中各个所述细长孔具有5至40的纵横比,其中所述纵横比是指长轴与短轴之比。

22. 如权利要求18所述的方法,其中所述第一多个细长孔或所述第二多个细长孔或两者各自具有椭圆形平面图轮廓。

23. 如权利要求18所述的方法, 其中所述第一多个细长孔或所述第二多个细长孔或两者各自具有S形平面图轮廓。

24. 如权利要求18所述的方法, 其中所述第一多个细长孔或所述第二多个细长孔或两者各自具有Z形平面图轮廓。

25. 如权利要求18所述的方法, 其中所述第一多个细长孔或所述第二多个细长孔或两者各自具有杠铃形平面图轮廓, 所述杠铃形平面图轮廓包括通过细长狭槽连接的一对隔开的钻孔。

26. 如权利要求18所述的方法, 所述第一多个细长孔或所述第二多个细长孔或两者各自具有I形平面图轮廓, 所述I形平面图轮廓包括通过细长狭槽连接的一对隔开的半圆形狭槽。

27. 如权利要求18所述的方法, 其中将所述第一多个细长孔和所述第二多个细长孔排布成行和列的阵列。

28. 如权利要求27所述的方法, 其中所述行彼此等间隔开并且所述列彼此等间隔开。

29. 如权利要求18所述的方法, 其中所述第一多个细长孔的长轴基本上垂直于所述第二多个细长孔的长轴。

30. 如权利要求18所述的方法, 其中所述角度为40度至70度。

31. 如权利要求18所述的方法, 其中所述NPR特性包括-0.2%至-0.9%的泊松比。

32. 如权利要求18所述的方法, 其中所述细长孔具有0.3%至9%的预定孔隙率, 其中孔隙率定义为

$$A_A/A_S$$

$A_A$ 为所述第一多个细长孔和所述第二多个细长孔的表面积,  $A_S$ 为所述顶表面的表面积。

## 用于自定义NPR特性和改善的冷却性能的以工程化图案具有成角度的狭槽的拉胀结构

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请要求2015年2月20日提交的第62/118,826号美国临时专利申请和2015年1月9日提交的第62/101,840号美国临时专利申请的优先权,所述两篇临时专利申请通过引用各自以整体并入本文。

### 技术领域

[0003] 本公开通常涉及具有调整的各向同性和各向异性泊松比的多孔材料和蜂窝(cellular)固体。更具体地,本公开的方面涉及表现出负泊松比(NPR)特性的具有工程化图案的拉胀结构、以及使用该结构的系统、方法和装置。

### [0004] 背景

[0005] 当沿特定轴压缩材料时,最常观察到该材料在与所施加轴向载荷成横向的方向上延展。相反地,当沿着与收缩轴成横向的轴施加拉伸载荷时,大部分材料沿着特定的轴收缩。表征这种特性的材料性质称为泊松比,其可以定义为在轴向载荷条件下横向/侧向应变与轴向/纵向应变的负的比例。多数材料的特征在于正泊松比,其对于橡胶而言约为0.5,对于铝、黄铜和钢而言约为0.3,并且对于玻璃而言约为0.2。

[0006] 在另一方面,当在轴向压缩(或拉伸)时,具有负泊松比的材料会在横向收缩(或延展)。表现出负泊松比特性的材料通常被称为“拉胀”材料。许多调查结果表明,拉胀特性涉及材料的微观结构与其形变之间的相互作用。通过以下发现提供了这种实例:具有立方晶格的金属、天然层状陶瓷、铁电多晶陶瓷和沸石均可以表现出负泊松比特性。此外,已提出几种几何结构和机制以实现负的泊松比值,包括具有内凹(reentrant)结构的泡沫、分级层压制品、聚合物泡沫和金属泡沫。还使用由软光刻装配的复合材料在微米级证实了负泊松比效果,并且使用碳纳米管的片组件在纳米级证实了负泊松比效果。

[0007] 在装配拉胀材料中的显著挑战是该材料通常涉及在主体基质内具有缠结几何结构的嵌入结构。因此,制造方法在朝向应用的实际开发中遇到了瓶颈。许多拉胀材料的基础结构是蜂窝固体结构。关于这些材料的形变的研究是相对成熟的领域,主要强调了在压缩载荷下屈曲现象对载荷承载力和能量吸收的作用。最近,实验和数值研究的综合结果证实,2D周期性多孔结构中的机械不稳定性可以引起原始几何结构的急剧转变。具体地,发现弹性基质中圆形孔洞的方形阵列的单轴载荷导致在该阵列处于载荷时产生交替相互正交的椭圆形图案。这是由于高于所施加应变的临界值的弹性不稳定性引起的。在不稳定性下观测到的几何重组是可逆和可重复的,并且这在窄范围的施加载荷中发生。此外,示出了图案转变引起2D结构的单向负泊松比特性,即,这仅在压缩下发生。

[0008] 第5,233,828号美国专利(“828专利”)示出了工程化空隙结构的实例,即用于高温应用的燃烧器衬套或“隔热屏”。燃烧器衬套通常用于燃气轮机的燃烧部分。燃烧器衬套也可以用于燃气轮机的排气部分或者其他部分或组件,例如涡轮叶片。在运行中,燃烧器在极高的温度下(例如约3,000°F或更高)燃烧气体。为了防止这种剧热在排至涡轮之前损坏

燃烧器,将燃烧器衬套提供在燃烧器的内部以隔离周围的发动机。为了使横跨燃烧器衬套的温度差和压力差最小化,通常提供冷却特征,如‘828专利中所示,以连续图案布置的间隔冷却孔洞的形式。作为另一实例,第8,066,482B2号美国专利示出了具有椭圆形冷却孔洞的工程化结构构件以加强燃气轮机的期望区域的冷却,同时降低冷却孔洞内和周围的应力水平。第EP0971172A1号欧洲专利也示出了用于燃气轮机的燃烧区的穿孔衬套的另一实例。然而,所有上述专利文件均未提供公开作为表现出拉胀特性或设计成提供NPR效果的实例。

[0009] 第2010/0009120A1号美国专利申请出版物公开了多种变化的周期性结构,其包括在施加临界宏观应力或应变时经历结构构型转变的弹性或弹塑性周期性固体。所述转变改变几何图案,改变了变化周期性结构中的特征的间隔和形状。一旦去除临界宏观应力或应变,这些弹性周期性固体恢复它们的原始形式。相比较而言,第2011/0059291A1号美国专利申请出版物公开了结构化多孔材料,其中该多孔结构提供了调整的泊松比特性。这些多孔结构由弹性片中椭圆形或类椭圆形空隙的图案构成,所述弹性片经由空隙的变形力学和材料的变形力学进行调整,以提供负泊松比或零泊松比。所有上述专利文件各自以整体并出于所有目的通过引用并入本文。

#### [0010] 发明概述

[0011] 本公开的方面涉及具有重复的细长孔(在本文中也被称为“空隙”或“狭槽”)图案的拉胀结构,所述细长孔被设计成提供期望的负泊松比(NPR)特性和改善的冷却性能。不同于现有技术的NPR空隙形状,即其延伸穿过结构材料的平面,以垂直于所述材料的平面的方向穿过所述材料的厚度,而本文公开的NPR空隙以与所述材料的平面倾斜的角度穿过所述材料的厚度。这些成角度的空隙配置增强了结构的冷却性能,同时保留低孔隙率并提供期望的NPR特性。本公开的其他方面涉及多功能NPR结构,其在燃气轮机的热部分具有成角度的空气通道。其他方面涉及燃气轮机燃烧器,其由提供特定的热、阻尼和/或声学功能的具有设计为成角度的空隙特征的材料制成壁。此类功能包括,例如,声衰减(或噪声阻尼)、应力减小(或载荷阻尼)以及热冷却(或热阻尼)。

[0012] 根据本公开的方面,公开了具有成角度的NPR狭槽的拉胀结构。在实例中,拉胀结构包括具有相对的顶表面和底表面的弹性刚体,例如金属片或其他足够弹性的固体材料。第一多个细长孔和第二多个细长孔从顶表面至底表面延伸穿过弹性刚体。第一多个细长孔相对于第二多个细长孔横向(例如,正交地)延伸。第一多个细长孔和/或第二多个细长孔与弹性刚体的顶表面和/或底表面倾斜成角度。在实例中,各个狭槽以与材料的平面成倾斜角度(例如,约40至70度)穿过片材的厚度。将细长孔协同配置以提供期望的或最小的冷却性能,同时在宏观平面载荷条件下通过负泊松比(NPR)特性表现出应力减小。例如,将细长孔设计成具有预定孔隙率、预定图案和/或预定纵横比以实现期望的NPR特性。拉胀结构可以表现出约30%至50%的泻流冷却效果、约0.3%至约9%的孔隙率以及约-0.2%至-0.9%的泊松比。可以将冷却效果(Eta)定义为在冷却装置存在下热气温度与壁温度的差值除以热气温度与供应的冷却气体的温度的差值:
$$\text{Eta} = (T_{\text{热气}} - T_{\text{壁}}) / (T_{\text{热气}} - T_{\text{冷却剂}})$$

[0013] 根据本公开的其他方面,泻流冷却拉胀片结构是其特征。在实例中,提出了泻流冷却拉胀片结构,其包括具有相对的顶表面和底表面的金属片。第一多个细长孔和第二多个细长孔从顶表面至底表面延伸穿过金属片。第一多个细长孔具有第一组几何特性并以第一图案进行排布。同样地,第二多个细长孔具有第二组几何特性并以第二图案进行排布。第一

多个细长孔相对于第二多个细长孔正交定向。各个细长孔相对于弹性刚体的顶表面倾斜成角度。第一多个细长孔的几何特性和图案与第二多个细长孔的几何特性和图案协同配置以提供期望的或最小的冷却性能,同时在宏观平面载荷条件下表现出负泊松比 (NPR) 特性。

[0014] 本公开的其他方面涉及制造拉胀结构的方法和使用拉胀结构的方法。在实例中,提出了用于制造拉胀结构的方法。所述方法包括:提供具有相对的顶表面和底表面的弹性刚体;向所述弹性刚体添加从顶表面至底表面延伸穿过弹性刚体的第一多个孔,将所述第一多个孔排布成行和列;以及向弹性刚体添加从顶表面至底表面延伸穿过弹性刚体的第二多个孔,将所述第二多个孔排布成行和列。第一多个细长孔和/或第二多个细长孔中的各个孔与弹性刚体的顶表面倾斜成角度。将第一多个孔和第二多个孔协同配置以提供期望的或最小的冷却性能,同时在宏观平面载荷条件下表现出负泊松比 (NPR) 特性。例如,将细长孔设计成具有预定孔隙率、预定图案和/或预定纵横比以实现期望的NPR特性。拉胀结构可以表现出约30%至50%的泻流冷却效果以及约-0.2%至-0.9%的泊松比。弹性刚体可以采取各种形式,例如金属片或其他足够弹性的固体材料。

[0015] 以上发明概述并非旨在表示本公开的各个实施方案或各个方面。而是,上述发明概述仅提供了本文阐述的一些新颖方面和特征的示例。当结合附图和所附权利要求时,从以下用于实施本发明的典型实施方案和模式的详述中,本公开的以上特征和优点以及其他特征和优点是易于显而易见的,所述特征和优点被认为单独或以任意组合都具有创造性。

#### [0016] 附图简述

[0017] 图1是标称应变与泊松比的图,例示了根据本公开的方面的具有细长通孔的代表性结构的泊松比特性。

[0018] 图2A至图2C是图1中对应于图中的特定数据点的代表性结构的示例。

[0019] 图3A和图3B分别是根据本公开的方面的成角度的NPR S狭槽的侧视图和透视图示例。

[0020] 图4A至图4D是根据本公开的方面的其他成角度的NPR狭槽的透视图示例。

[0021] 图5A和图5B分别是根据本公开的方面的具有可变的罩盖旋转的成角度的NPR S狭槽和倾斜NPR Z狭槽的平面图示例。

[0022] 图6A至图6D是根据本公开的方面的分别呈现0度角、45度角、55度角和65度角的成角度的NPR S狭槽的平面图示例。

[0023] 图7A至图7C分别是根据本公开的方面的非NPR垂直冷却孔、垂直NPR冷却狭槽和成角度的NPR冷却狭槽的冷却特性的图解示例。

[0024] 本公开容许各种修改和替代形式,并且例如已在附图中示出一些代表性实施方案,并且将在本文详细描述。然而,应理解,本公开的发明方面不限于附图中例示的具体形式。而是,本公开涵盖落入由所附权利要求限定的发明主旨和范围内的所有修改、等同物、组合和子组合以及替代方案。

#### [0025] 例示实施方案的详述

[0026] 本公开容许各种不同形式的实施方案。在附图中示出并且将在本文中详细描述代表性实施方案,应理解,本公开被视为本公开的原理的示例,并且不旨在将本公开的广义方面限于所例示的实施方案。在这种情况下,例如在摘要、概述和详述部分中公开但未在权利要求中明确阐述的要素和限制不应通过暗示、推断或以其他方式单独或共同地并入权利要

求中。为了本详述的目的,除非明确否定或在逻辑上禁止:单数包括复数,反之亦然;并且词语“包括”或“包含”或“具有”意指“包括但不限于”。此外,近似的词语,例如“约”、“几乎”、“基本上”、“大约”等,可以以例如“在、接近、或近似于”或“在...的3%至5%内”或“在可接受的制造公差内”或它们的任何合理组合的含义用于本文。

[0027] 本公开的方面涉及拉胀结构,其包括当宏观载荷时提供负泊松比(NPR)特性的成角度的狭缝的重复图案。泊松比(或“泊松系数”)通常可以表示在拉伸对象中横向收缩应变与纵向延伸应变的比例。大部分材料的泊松比通常为正值,包括许多合金、聚合物、聚合物泡沫和蜂窝固体,当拉伸时它们的横截面变较薄。本文公开的拉胀结构表现出负泊松比特性。

[0028] 根据本公开构思的方面,当沿着一个轴(例如,在Y方向)压缩拉胀结构时,由于相邻的孔的排布方式,同轴应变导致围绕每个单元的中心力矩。进而,这引起单元旋转。每个单元以与其直接相邻单元的方向相反的方向旋转。这种旋转导致水平相邻单元之间的横轴(X方向)距离减小。也就是说,在Y方向压缩结构引起其在X方向收缩。相反,在Y方向的拉力导致在X方向延展。在整个结构的尺度上,这模拟了拉胀材料的特性。但是本文公开的许多结构由常规材料组成。因此,未掺杂材料自身可以具有正泊松比,但是通过引入本文公开的成角度的狭缝图案来修改结构,则该结构表现为具有负泊松比。

[0029] 图1是泊松比(PR)对标称应变的图,例示出图2A至图2C中示出的三种代表性空隙结构的泊松比特性。图1的图表示出了在载荷下各个试验片的泊松比。在某一水平的形变时,可以针对表示形变水平的参数(例如,标称应变)确定并标绘“瞬时”PR。当设计者对于预期的应用具有期望的NPR时,可以确定对应于所期望的PR的形变水平并且可以确定在此条件下的孔洞的几何结构。然后可以在无应力部分上加工(制造)该孔洞形状图案以实现具有期望的PR的组件。

[0030] 如图2B和图2C所示,NPR孔图案可以由如椭圆形通槽所示的水平垂直定向的细长的孔洞(也称为“孔”或“空隙”或“狭槽”)组成。这些细长的孔洞按以下方式排布在水平线和垂直线上(例如,图2B中方形阵列的行和列):垂直线为等间隔并且在两维度中水平线等间隔(即 $\Delta x = \Delta y$ )。各个狭槽的中心在两条线的交叉点上。水平定向和垂直定向的狭槽在垂直线和水平线上交替,使得任何垂直定向的狭槽被水平定向的狭槽包围(反之亦然),同时下一个垂直定向狭槽出现在两个对角线上。这些空隙还可以用作冷却孔和/或阻尼孔洞,并且由于它们的排布,还可以用作应力降低特征。本文所示的一个或多个狭槽可以被细长的NPR突起或半球形浅凹替代。

[0031] 还公开燃气轮机燃烧器,其由具有本文公开的任何特定拉胀结构配置的材料的一个或多个壁制成。在一些实施方案中,直接在金属体中以无应力状态产生成角度的狭缝,使得孔在形状上与在外部载荷下橡胶中发现的坍塌空隙形状相同,以便在制造中无金属结构坍塌的情况下在金属体中得到NPR特性。可以使用各种制造途径以重复金属组件中的空隙图案。制造不一定含有挫曲作为方法步骤之一。本文公开的拉胀结构不限于燃烧器壁;而是,可以将这些特征并入涡轮机的其他部分(例如,叶片、刀片等)。

[0032] 在常规的燃烧器壁中,用于冷却空气流和阻尼的孔还用作应力集中体。在一些公开实施方案中,当将热点处的壁材料例如在垂直方向上挤压在其周围材料上时,负泊松比将使壁材料在水平方向上收缩,反之亦然。这种特性会显著降低热点处的应力。这种作用比仅降低刚度的影响更强。热点处的应力降低例如50%,这进而导致应力疲劳寿命增加几个



数量级。由NPR特性引起的应力降低不会增加燃烧器壁的空气损耗。如此,可以使用更长的寿命或者可以用较便宜的材料替代壁材料,以降低原材料成本。

[0033] 还已经证明用2%至3%的细长和成角度的空气通道的一部分替代圆形燃烧器冷却孔洞将热机械应力降低至少五倍,同时维持冷却和阻尼性能。例如,已预期燃烧器中的椭圆形冷却孔洞导致最差主应力下降五倍。因此,引起NPR特性,向燃烧器的冷却孔洞添加了其他功能,因为与传统的冷却孔洞相比,NPR特性在最差主应力中产生了五倍降低。在燃烧器特定超合金的应力疲劳中,组件应力减半使疲劳寿命增加超过一个数量级。在一些实施方案中,超合金可以是镍基超合金,例如Inconel (例如IN100、IN600、IN713)、Waspaloy、Rene合金(例如Rene 41、Rene 80、Rene 95、Rene N5)、Haynes合金、Incoloy、MP98T、TMS合金和CMSX (例如CMSX4) 单晶合金。

[0034] 已示出优化的孔隙率提供增加冷却功能。如本文所用,可以将“孔隙率”定义成意指孔的表面积 $A_A$ 除以结构的表面积 $A_S$ ,或者孔隙率= $A_A/A_S$ 。在一些实施方案中,期望的是,给定空隙结构的孔隙率约为0.3%至9.0%,或者在一些实施方案中,约为1%至4%,或者在一些实施方案中,约为2%。相比之下,许多现有技术的排布需要40%至50%的孔隙率。

[0035] 对于细长的孔可以存在预定的最佳纵横比,以提供期望的NPR特性。如本文所用,可以将孔的“纵横比”定义成意指孔的长度除以孔的宽度,或者孔的长轴长度除以孔的短轴长度。在一些实施方案中,期望的是,孔的纵横比约为5至40,或者在一些实施方案中,约为20至30。最佳NPR可以包括例如约-0.2至约-0.9的PR,或者对于一些实施方案,为约-0.5。本公开构思的方面可以在用毫米的图案长度尺度产生的结构图案上来证实,并且同样适用于具有较小长度尺度(例如,微米、亚微米和纳米长度尺度)或较大长度尺度的相同周期性图案的结构,只要单位单元适于结构。

[0036] 接下来转到图3至图6,示出根据本公开表现出期望的NPR特性和增强的冷却性能的成角度的狭槽拉胀结构的各种实例。例如,图3A和图3B例示了拉胀结构,通常表示为300,其利用细长的非对称狭缝的交替图案。前述的狭槽是细长的,在狭槽中各自具有大于并垂直于短轴(例如,宽度)的长轴(例如,长度)。如示出,拉胀结构300包括弹性刚体310,其可以为金属片或具有适当弹性的其他固体材料的形式,以便一旦充分减小或消除宏观载荷条件,则基本上或完全恢复至其原始形式。弹性刚体310具有与第二(底)表面316成相对间隔关系的第一(顶)表面314。装配成弹性刚体310的是第一多个S形通槽(在本文中也称为“孔”或“空隙”或“狭槽”),在本文中表示为狭槽312,它们从顶表面314至底表面316延伸穿过所述体310。第二多个S形通槽/孔,在本文中表示为狭槽318,也从顶表面314至底表面316延伸穿过弹性刚体310。存在于弹性刚体310中的细长孔的图案在排布中可以与图2B和图2C中所见的排布相似。

[0037] 将S形通槽312、318排布成行和列的阵列或矩阵,并且第一多个细长孔312相对于第二多个细长孔318横向延伸。应注意,为了清楚起见,已从图3A和图3B中省略了表示狭槽318的内部结构配置的虚线,以更好地示出狭槽312的内部结构配置。对于至少一些实施方案,行彼此等间隔,同样地,列彼此等间隔。根据图3A和3B所例示的实施方案,例如,各行和各列包含与水平定向的S形通槽318交错的垂直定向的S形通槽312。实际上,各个垂直定向的通槽312在四个侧面上与水平定向的通槽318相邻,同时各个水平定向的通槽318在四个侧面上与垂直定向的通槽312相邻。利用这种排布,第一多个S形通槽312的短轴平行于阵列

的行,然而第二多个S形通槽318的短轴平行于阵列的列。因此,通槽318的长轴(平行于阵列的行)垂直于通槽312的长轴(平行于阵列的列)。可以预期,用于通过NPR特性实现应力减小的其他图案和排布在本公开的范围和主旨内。

[0038] 所例示的细长的、成角度的狭槽的图案提供了特定的孔隙率(例如,约0.3%至约9.0%的孔隙率)和期望的冷却性能(例如,约30%至50%的泻流冷却效果),同时在宏观平面载荷条件下(例如,当在片的平面中施加拉力或压缩时)表现出期望的负泊松比特性(例如,约-0.2至约-0.9的PR)。当将拉胀结构300例如经由拉力 $F_T$ 沿着垂直轴Y拉伸时,在垂直方向上的轴向应变导致围绕各个单元的中心力矩,这引起单元旋转。单元可以由与两个在垂直方向上相邻的水平狭槽对齐的两个在横向上相邻的垂直狭槽组成,以形成方形单元。各个单元以与其直接相邻的单元的方向相反的方向旋转。这种旋转增大了在水平上相邻的单元之间的X方向距离,使得在Y方向上拉伸结构引起其在X方向上拉伸。第一多个S形通槽312具有(第一)工程化几何特性,包括预定的几何结构和预定的纵横比,而第二多个S形通槽318具有(第二)工程化几何特性,包括预定的几何结构和预定的纵横比,它们与孔图案的(第三)工程化几何特性协同配置,所述(第三)工程化几何特性包括NPR狭槽密度和单元排布,以在宏观载荷条件下实现期望的NPR特性。

[0039] 第一多个细长S形通槽312和/或第二多个细长S形通槽318中的各个狭槽可以相对于拉胀结构300的弹性刚体310的顶表面314或底表面316或两者倾斜成角度。在实例中,在图3A中示出狭槽312,其以与材料的水平平面倾斜的角度穿过材料的整个厚度。对于至少一些实施方案,各个孔与拉胀结构的主体310的顶表面314和底表面316的角 $\Phi$ 为约20至80度,或者在一些实施方案中,约为40至70度。这些宏观上图案化的NPR空隙,如S形成角度的狭槽(图3A、图3B、图4A和图5A),或者同样地,I形成角度的狭槽(图4B)、杠铃形成角度的狭槽(图4C)、椭圆形成角度的狭槽(图4D)、Z形成角度的狭槽(图5B)、C形成角度的狭槽等,用作泻流冷却孔,其允许冷却流体FL穿过拉胀结构的一个表面,以倾角 $\alpha$ 穿过所述体,如图3A所示,并且穿过拉胀结构的相对表面。与传统的冷却狭槽/孔洞相比,这种配置增强了膜冷却性能,所述传统的冷却狭槽/孔洞垂直于所述体的厚度,因此更加限制了冷却流体流动。可以将倾角 $\alpha$ 定义为入射矢量与其在材料平面上的投影之间的角。该倾角可以在 $360^\circ$ 自由旋转自由度中变化以实现拉胀特性和膜冷却性能的许多期望的组合。可以将冷却效果(Eta)代表为无量纲的值,其定量地表示流经多孔表面的流体如何有效地保护该表面免于高温主流流动。可以将冷却效果定义为在冷却装置存在下热气体温度与壁温度的差值除以热气体温度与供应的冷却气体的温度的差值: $\text{Eta} = (T_{\text{热气}} - T_{\text{壁}}) / (T_{\text{热气}} - T_{\text{冷却剂}})$ 。

[0040] 已示出图案化的成角度的NPR狭槽特征,例如在图3至图6中公开的狭槽特征,以比常规直角(垂直)圆形孔洞和冷却狭槽显著更好地冷却,因为狭槽的内表面积大于垂直的圆形孔洞或狭槽的内表面积。例如,由于冷却空气更均匀的分布在表面上方以及降低的冷却剂喷射渗透进入主流的流中,所以与传统的垂直冷却孔洞和狭槽相比,还提高了绝热膜的冷却效果。当分别比较图7A、图7B和图7C的代表性非NPR垂直冷却孔洞(Eta=17%)、垂直NPR冷却槽(Eta=36%)和成角度的NPR S槽(Eta=44%)的冷却特性时,可以看到这一点。成角度的NPR狭槽膜可以受益于康达(Coanda)效应,其导致冷却剂喷射更好地粘附于壁,而不是脱离并渗透到主流的流中。这有助于减小倾角,进而降低冷却剂喷射渗透并提高NPR狭槽的冷却性能。从空气动力学的视角来看,与垂直冷却剂狭槽流相比,由于膜冷却,成角度

的NPR狭槽减小冷却剂喷射的渗透降低了空气动力学损耗。可以改变倾角以实现期望的拉胀特性和膜冷却性能的组合。

[0041] 已经确定,与具有垂直于冷却流的内壁的垂直冷却孔洞相比,具有倾斜冷却狭槽有助于提供更好的膜冷却效果的覆盖。此外,早期研究表明,从成角度的NPR狭槽中的冷却剂喷射比从垂直冷却孔洞中的喷射更有效,因为对于从狭槽中喷射的封闭膜,混合过程较不密集。尽管在燃气轮机刀片和叶片上遇到的高热应力通常不允许用于所述高度细长的狭槽,但成角度的NPR狭槽有助于减小或以其他方式消除涡轮机刀片/叶片上的高热应力,同时增强膜冷却性能。对于至少一些实施方案,通常期望使表面孔隙率和用于涡轮发动机中的冷却剂的量最小化;可以用较小数目的成角度的NPR狭槽替代垂直NPR狭槽以使孔隙率最小。在这种情况下,冷却流消耗将减小,同时维持泻流狭槽的膜冷却性能。

[0042] 作为公开特征的示例性实施,可以考虑具有片状金属壁的燃烧器衬套,其中用形成拉胀结构的成角度的S形NPR狭槽的图案替代常规圆形泻流孔洞或垂直的泻流狭槽。通过这些成角度的S形狭槽供给的冷却空气从结构中去热,并且在表面上方产生冷却空气的均匀分布。这些具有增加的内表面积成角度的狭槽增强了膜冷却性能并改善机械响应。此外,与具有垂直泻流孔的常规片状金属壁相比,成角度的NPR狭槽能够维持较高的火焰温度,并且有助于赋予该片更长的寿命。

[0043] 图4A至图4D中示出的是具有根据本公开的方面的成角度的NPR狭槽的其他拉胀结构的透视图示例,通常分别以400A、400B、400C和400D表示。虽然外观不同,但是拉胀结构400A至400D可以包括关于其他拉胀结构的本文描述的任何特征、选择和替代方案。同样地,除非明确放弃或在逻辑上禁止,否则本文公开的任何拉胀结构可以与其他公开的实施方案共享特征、选择和替代方案。拉胀结构400A至400D分别各自包含弹性刚体410A、410B、410C和410D,分别用多个细长的和成角度的孔412A、412B、412C和412D进行装配,以提供期望的冷却性能、同时在宏观平面载荷条件下表现出预定NPR特性的图案进行排布。在图4A中,细长孔412A具有S形平面图轮廓,然而在图4B中,细长孔412B具有I形平面图轮廓,其包括通过细长线形狭槽连接的一对隔开的半圆形狭槽。相比之下,图4D中的细长孔412D具有椭圆形平面图轮廓,然而图4C中的细长孔412C具有杠铃形平面图轮廓,其包括通过细长线形狭槽连接的一对隔开的圆形钻孔。可以通过激光切割制造任一前述成角度的NPR狭槽,例如,通过沿着与表面的倾角排布NPR狭槽的线形图案。

[0044] 继续参考图4A至图4D,可以将在外(顶)表面上出现的成角度的NPR狭槽的轮廓设计为标准形状的投影,例如,标准“S”414A、具有圆形臂的标准“I”414B、具有圆形端部的标准杠铃414C以及标准椭圆414D。任选地,在外(顶)表面上出现的成角度的NPR狭槽的轮廓可以与原始图像高度失真,例如,这取决于狭槽的期望的角度和/或定向。图6A至图6D例示了在管状拉胀结构的外表面上的狭槽失真:图6A例示了呈现0度角的垂直NPR S狭槽;图6B例示了呈现45度角的成角度的NPR S狭槽;图6C例示了呈现55度角的成角度的NPR S狭槽;以及图6D例示了呈现65度角的成角度的NPR S狭槽。

[0045] 可以通过减小罩盖长度511A和511B和/或罩盖高度513A和513B,开发新的NPR狭槽形状,例如,Z形狭槽512A(图5A)和S形狭槽(图5B),以提供与现有的或“标准”S形/Z形相似的水平投影。可以改变罩盖的尺寸和形状以实现期望的拉胀特性和膜冷却性能的组合。可以通过在热表面上方产生较长的热冷却层来改善成角度的泻流S形狭槽、或者同样地Z形狭

槽的膜冷却性能。可以通过以逆时针方向旋转S形狭槽罩盖(或者对于Z形狭槽罩盖为顺时针方向),增加垂直于自由主流的流的狭槽的侧面积,从而产生较长的热冷却层。可以改变该罩盖的旋转角度515A和515B以实现期望的拉胀特性和膜冷却性能的组合。通过以逆时针方向旋转S形狭槽的罩盖,在罩盖的顶部的最大机械应力将减小并且由于增加热冷却层覆盖在热表面上方,泻流槽的膜冷却性能将得到改善。

[0046] 本公开的方面还涉及制造拉胀结构的方法和使用拉胀结构的方法。例如,提出用于制造拉胀结构的方法,例如以上关于图3至图6描述的拉胀结构。该方法包括作为包括但非排他性的一组操作:提供弹性刚体,例如图3A和图3B的弹性刚体310,其具有相对的顶表面和底表面;向所述弹性刚体添加第一多个孔,例如图3A和3B的细长S形狭槽312,其从顶表面至底表面延伸穿过所述弹性刚体;以及向所述弹性刚体添加第二多个孔,例如图3A和图3B的细长S形狭槽318,其从顶表面至底表面延伸穿过所述弹性刚体。将第一多个孔和第二多个孔排布成行和列。第一多个孔和/或第二多个孔中的各个孔与弹性刚体的顶表面倾斜成角度。将第一多个孔和第二多个孔协调配置以提供预定的冷却性能,同时在宏观平面载荷条件下表现出预定的负泊松比(NPR)特性。例如,将细长孔设计成具有预定孔隙率、预定图案和/或预定纵横比以实现期望的NPR特性。拉胀结构可以表现出约30%至50%的泻流冷却效果和约-0.2%至-0.9%的泊松比。弹性刚体可以采取各种形式,例如金属片或其他足够弹性的固体材料。

[0047] 在一些实施方案中,方法至少包括以上列举的和在附图中例示的那些步骤。省略步骤、包括其他步骤和/或修改以上提到的顺序也在本发明的范围和主旨内。还应该注意,前述方法可以代表用于设计和装配拉胀结构的单一顺序。然而,预期的是,方法将以系统和重复的方式进行实践。

[0048] 本发明不限于本文公开的精确构造和组成。而是,由以上描述变得显而易见的任何和所有修改、改变、组合、排列和变体在如所附权利要求所限定的本发明的范围和主旨内。此外,本构思明确地包括前述要素和方面的任何和所有的组合和子组合。

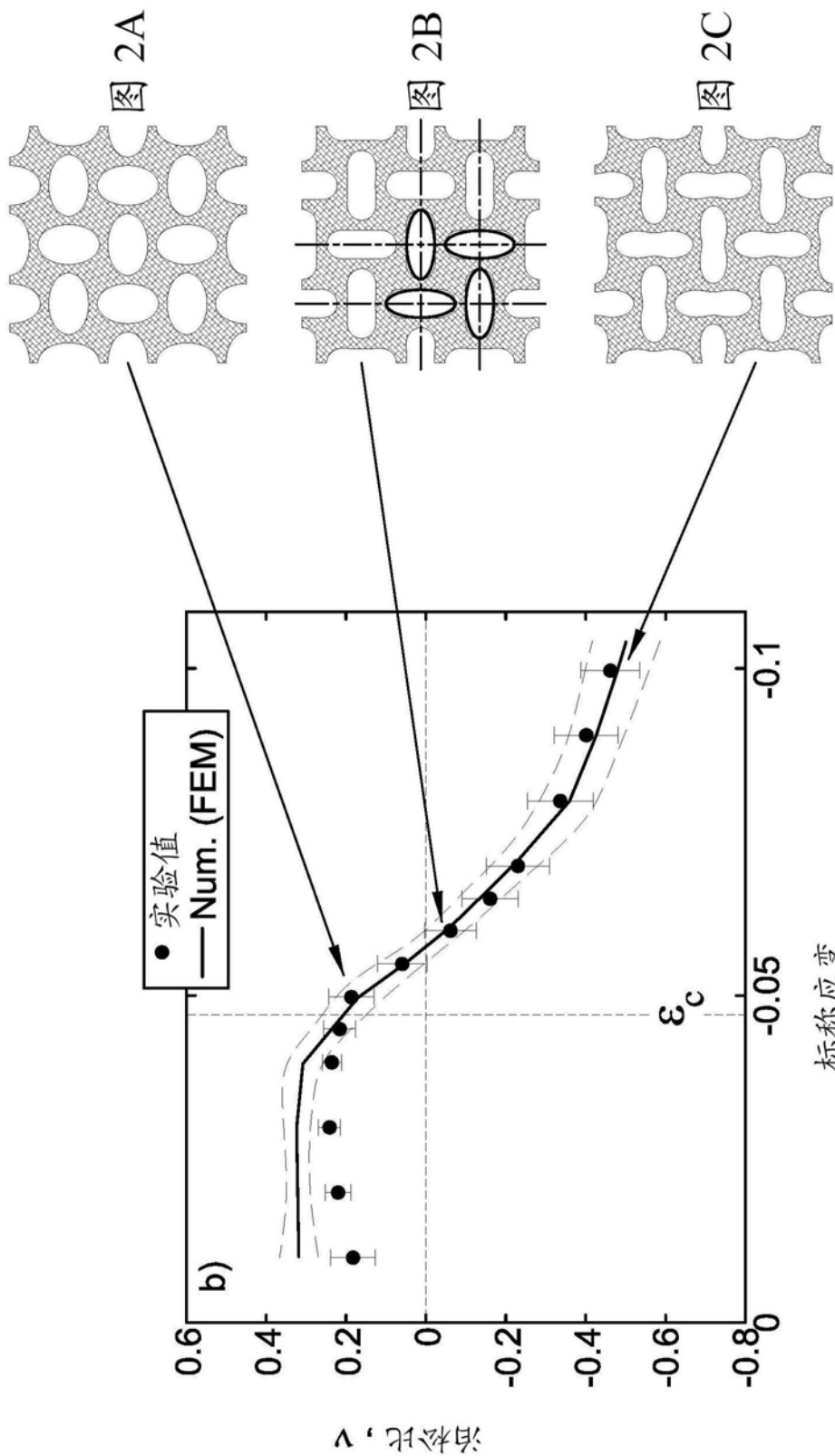


图 1

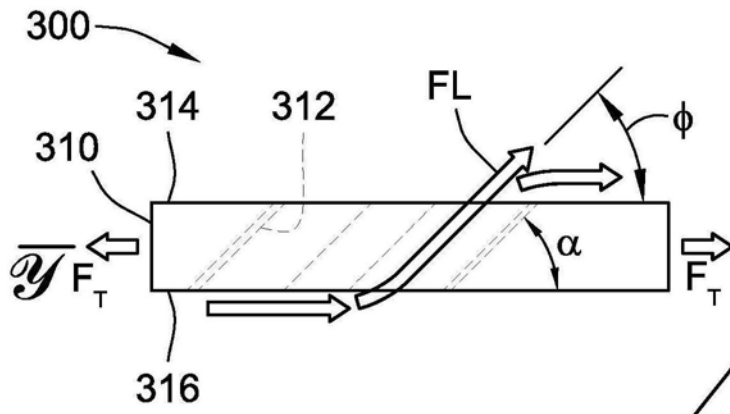


图 3A

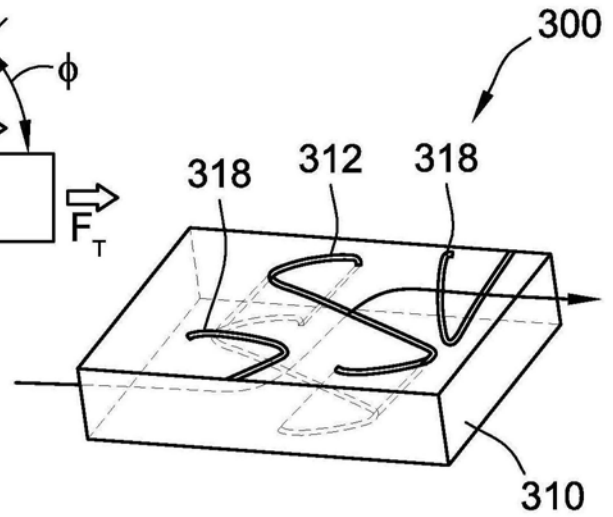


图 3B

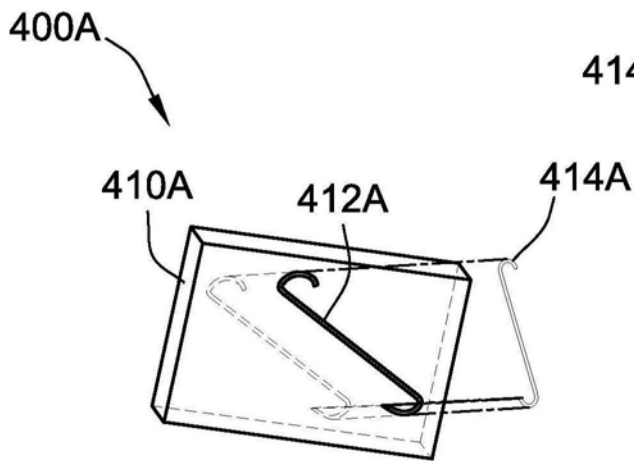


图 4A

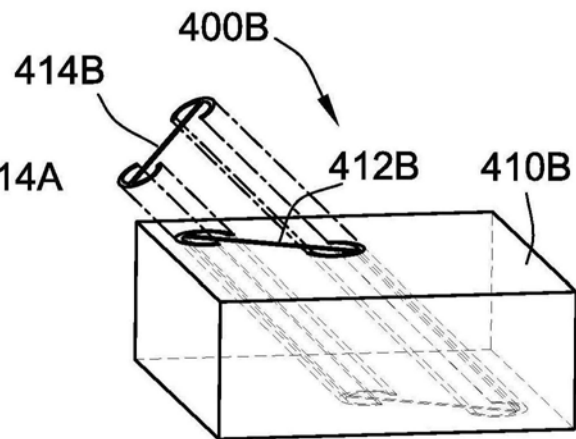


图 4B

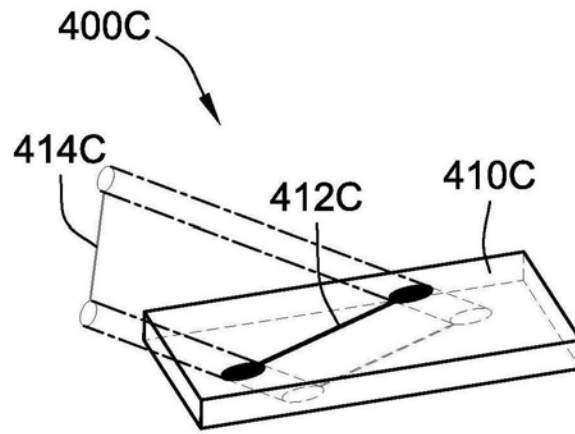


图4C

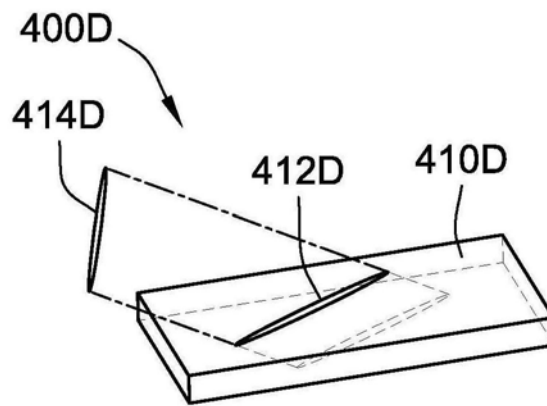


图4D

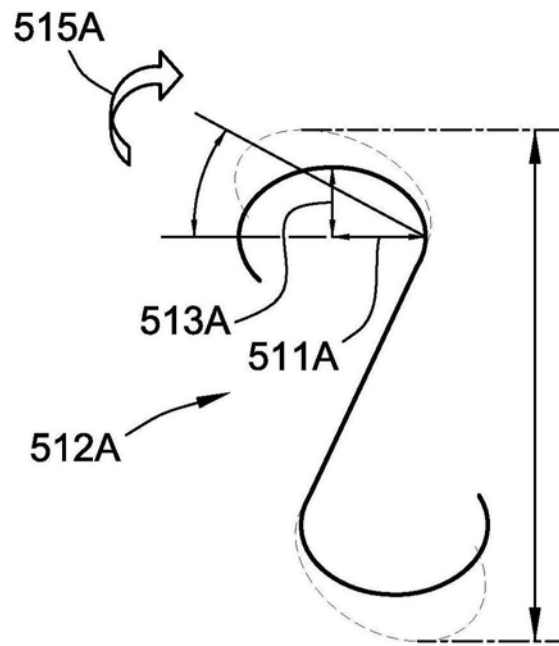


图5A

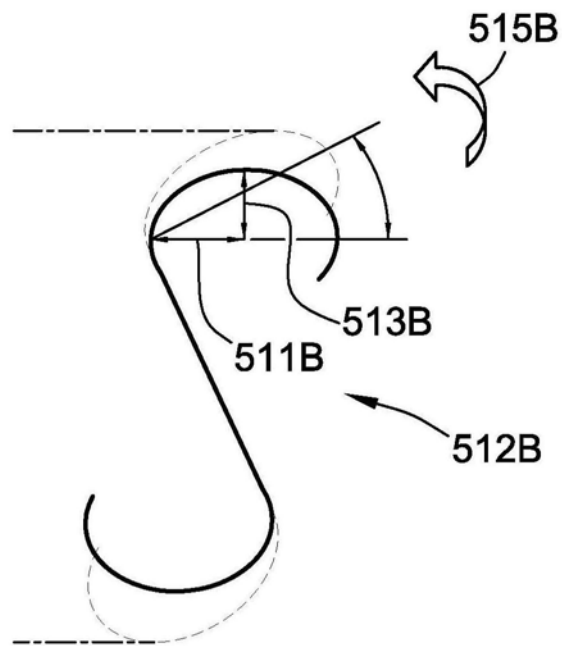


图5B



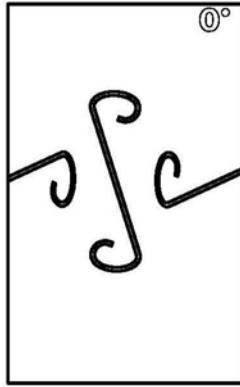


图6A

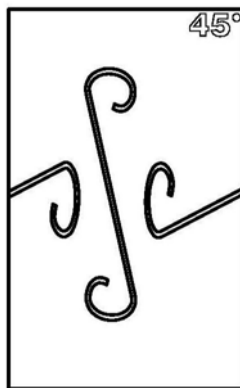


图6B



图6C



图6D

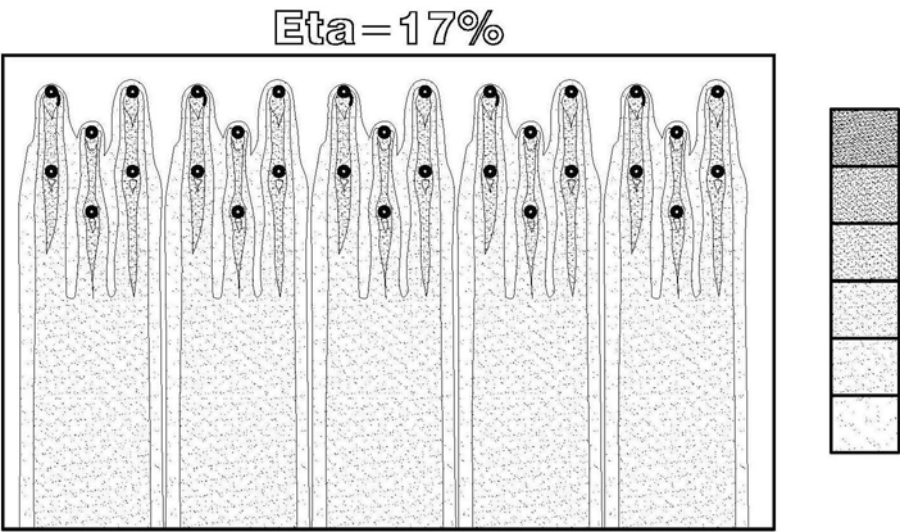


图7A

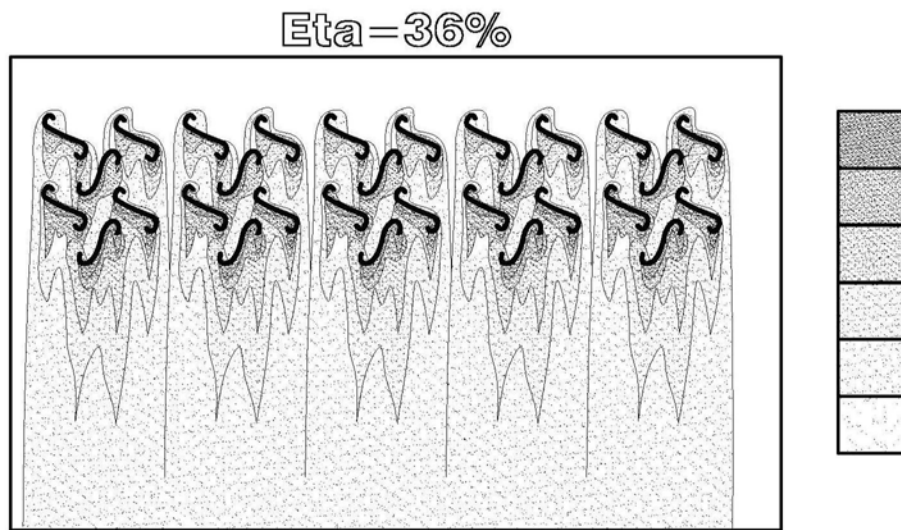


图7B

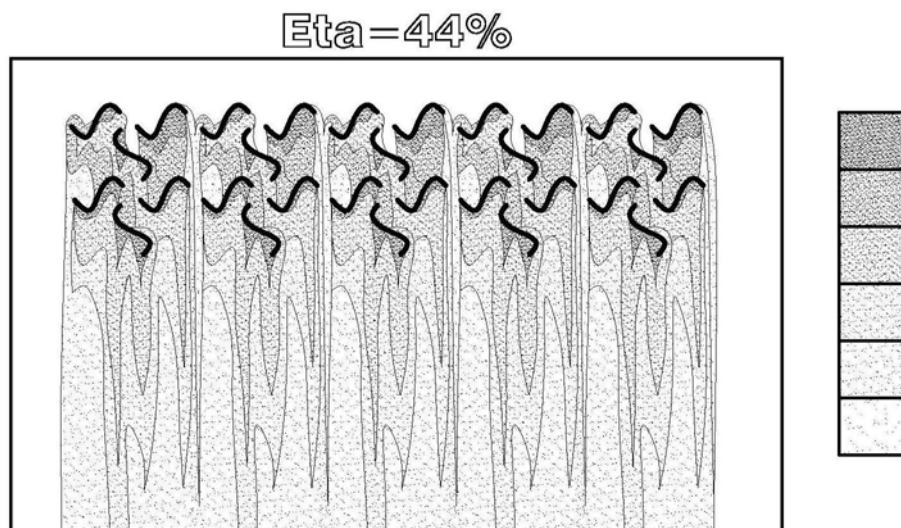


图7C