



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115533885 A

(43) 申请公布日 2022. 12. 30

(21) 申请号 202210728184.8

(22) 申请日 2022.06.24

(30) 优先权数据

17/364,142 2021.06.30 US

(71) 申请人 丰田自动车工程及制造北美公司

地址 美国得克萨斯

(72) 发明人 M·P·罗威 弦田辽平

(74) 专利代理机构 中国贸促会专利商标事务所

有限公司 11038

专利代理师 罗亚男

(51) Int. Cl.

B25J 9/10 (2006.01)

B25J 19/00 (2006.01)

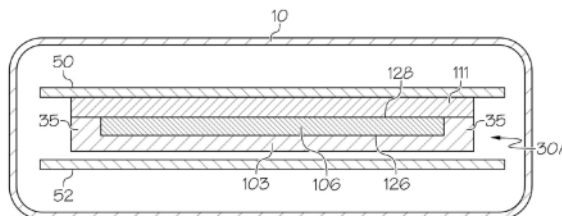
权利要求书2页 说明书17页 附图13页

(54) 发明名称

具有真空耦合的电极绝缘体的人造肌肉及其制造方法

(57) 摘要

本申请涉及具有真空耦合的电极绝缘体的人造肌肉及其制造方法。一种制造电极组件的方法,包括将包括定位在电极绝缘体和支撑聚合物之间的电极的层堆叠定位在真空袋中,从真空袋中去除空气从而将电极真空耦合到电极绝缘体,以及从真空袋中去除层堆叠,其中在从真空袋中去除层堆叠后,电极保持真空耦合到电极绝缘体并且电极绝缘体与电极直接接触,从而形成电极组件。



1. 一种制造电极组件的方法,该方法包括:
将包括定位在电极绝缘体和支撑聚合物之间的电极的层堆叠定位在真空袋中;
从真空袋中去除空气从而将电极真空耦合到电极绝缘体;以及
从真空袋中去除层堆叠,其中在从真空袋中去除层堆叠后,电极保持真空耦合到电极绝缘体并且电极绝缘体与电极直接接触,从而形成电极组件。
2. 如权利要求1所述的方法,还包括在将层堆叠定位在真空袋中的同时将支撑聚合物热密封到电极,使得在从真空袋中去除层堆叠后,支撑聚合物耦合到电极。
3. 如权利要求2所述的方法,其中支撑聚合物包括悬垂部分,在从真空袋中去除层堆叠后,支撑聚合物耦合到电极绝缘体。
4. 如权利要求2所述的方法,其中:
第一热释放层定位在电极绝缘体和真空袋之间;
第二热释放层定位在支撑聚合物和真空袋之间;以及
在将支撑聚合物热密封到电极之后,将第一热释放层和第二热释放层从层堆叠中去除。
5. 如权利要求1所述的方法,其中电极绝缘体包括高介电常数聚合物。
6. 如权利要求5所述的方法,其中高介电常数聚合物包括卤代聚合物。
7. 如权利要求6所述的方法,其中卤代聚合物包括PVDF。
8. 如权利要求1所述的方法,其中:
电极包括两个或更多个径向延伸部分和两个或更多个桥接部分;以及
所述两个或更多个桥接部分中的每个桥接部分互连相邻的径向延伸部分。
9. 如权利要求1所述的方法,其中支撑聚合物包括双轴定向的聚丙烯(BOPP)。
10. 一种制造人造肌肉的方法,该方法包括:
形成第一电极组件和第二电极组件,其中形成每个电极组件包括:
将包括定位在电极绝缘体和支撑聚合物之间的电极的层堆叠定位在真空袋中;
从真空袋中去除空气从而将电极真空耦合到电极绝缘体;以及
从真空袋中去除层堆叠,其中在从真空袋中去除层堆叠后,电极保持真空耦合到电极绝缘体并且电极绝缘体与电极直接接触,从而形成电极组件;
将第一电极组件和第二电极组件定位在第一膜层和第二膜层之间的堆叠布置中;以及
将第一膜层密封到第二膜层,从而形成包括容纳在由第一膜层和第二膜层形成的壳体内部的第一电极组件和第二电极组件的人造肌肉。
11. 如权利要求10所述的方法,其中:
形成每个电极组件还包括将支撑聚合物热密封到电极和电极绝缘体,同时将层堆叠定位在真空袋中,使得在从真空袋中去除层堆叠后,支撑聚合物耦合到电极;以及
支撑聚合物包括悬垂部分,在从真空袋中去除层堆叠后,该悬垂部分耦合到电极绝缘体。
12. 如权利要求10所述的方法,还包括将介电流体注射到第一电极组件和第二电极组件之间的人造肌肉中。
13. 如权利要求10所述的方法,其中将第一膜层密封到第二膜层定义人造肌肉的壳体的密封部分,壳体还包括被密封部分包围的未密封部分,其中壳体的电极区域和可扩展流

体区域部署在未密封部分中。

14. 如权利要求10所述的方法, 其中:

第一电极组件和第二电极组件中的每一个的电极包括两个或更多个径向延伸部分和两个或更多个桥接部分; 以及

所述两个或更多个桥接部分中的每个桥接部分互连相邻的径向延伸部分。

15. 如权利要求10所述的方法, 其中将第一膜层密封到第二膜层包括将第一膜层热密封到第二膜层。

16. 一种人造肌肉, 包括:

壳体, 包括电极区域和可扩展流体区域;

介电流体, 容纳在壳体内;

电极对, 定位在壳体的电极区域中, 电极对包括第一电极和第二电极; 以及

电极绝缘体, 电极绝缘体真空耦合到第一电极, 并与第一电极直接接触, 其中:

第一电极绝缘体包括高介电常数聚合物; 以及

电极对能够在非致动状态与致动状态之间被致动, 使得从非致动状态到致动状态的致动将介电流体指引到可扩展流体区域中, 从而使可扩展流体区域膨胀。

17. 如权利要求16所述的人造肌肉, 其中:

电极绝缘体包括第一电极绝缘体; 以及

第二电极绝缘体真空耦合到第二电极并与第二电极直接接触, 其中第二电极绝缘体包括高介电常数聚合物。

18. 如权利要求16所述的人造肌肉, 其中高介电常数聚合物包括卤代聚合物。

19. 如权利要求18所述的人造肌肉, 其中卤代聚合物包括PVDF。

20. 如权利要求16所述的人造肌肉, 其中:

第一电极和第二电极各自包括两个或更多个径向延伸部分和两个或更多个桥接部分;

所述两个或更多个桥接部分中的每个桥接部分互连相邻的径向延伸部分; 以及

第一电极和第二电极中的至少一个包括定位在所述两个或更多个径向延伸部分之间并环绕可扩展流体区域的中央开口。

具有真空耦合的电极绝缘体的人造肌肉及其制造方法

技术领域

[0001] 本说明书一般而言涉及人造肌肉,特别是涉及具有真空耦合的电极绝缘体的人造肌肉。

背景技术

[0002] 当前的机器人技术常常在结构化的环境中依靠刚性部件(诸如伺服马达)来执行任务。这种刚性在许多机器人应用中存在局限性,至少部分地是由伺服马达和其它刚性机器人设备的重量与功率比造成的。软机器人领域通过使用人造肌肉和其它软致动器来改善这些限制。人造肌肉试图模仿生物肌肉的多功能性、性能和可靠性。一些人造肌肉依靠基于流体的致动器。例如,某些人造肌肉可以将流体引入和引出体积以使人造肌肉膨胀或收缩,从而对负载执行机械工作。但是,由于对热密封和粘合剂的依赖,这些人造肌肉有一些材料限制。

[0003] 因而,需要促进使用难以热密封的材料的制造人造肌肉的方法。

发明内容

[0004] 在一个实施例中,一种制造电极组件的方法包括将包括定位在电极绝缘体和支撑聚合物之间的电极的层堆叠定位在真空袋中,从真空袋中去除空气从而将电极真空耦合到电极绝缘体,以及从真空袋中去除层堆叠,其中在从真空袋中去除层堆叠后,电极保持真空耦合到电极绝缘体并且电极绝缘体与电极直接接触,从而形成电极组件。

[0005] 在另一个实施例中,一种制造人造肌肉的方法包括形成第一电极组件和第二电极组件。形成每个电极组件包括将包括定位在电极绝缘体和支撑聚合物之间的电极的层堆叠定位在真空袋中,从真空袋中去除空气从而将电极真空耦合到电极绝缘体,以及从真空袋中去除层堆叠,其中在从真空袋中去除层堆叠后,电极保持真空耦合到电极绝缘体并且电极绝缘体与电极直接接触,从而形成电极组件。该方法还包括将第一电极组件和第二电极组件定位在第一膜层和第二膜层之间的堆叠布置中,并将第一膜层密封到第二膜层,从而形成包括容纳在由第一膜层和第二膜层形成的壳体内部的第一电极组件和第二电极组件的人造肌肉。

[0006] 在又一个实施例中,人造肌肉包括具有电极区域和可扩展流体区域的壳体。介电流体容纳在壳体内。电极对定位在壳体的电极区域中,电极对包括第一电极和第二电极。电极绝缘体真空耦合到第一电极,与第一电极直接接触。电极绝缘体包括高介电常数聚合物并且电极对可在非致动状态与致动状态之间被致动,使得从非致动状态到致动状态的致动将介电流体指引到可扩展流体区域中,从而使可扩展流体区域膨胀。

[0007] 鉴于以下详细描述并结合附图,将更充分地理解由本文描述的实施例提供的这些和附加特征。

附图说明

[0008] 附图中阐述的实施例在本质上是说明性和示例性的,并且不旨在限制由权利要求定义的主题。当结合以下附图阅读时,可以理解说明性实施例的以下详细描述,其中类似的结构用类似的附图标记指示并且其中:

[0009] 图1示意性地描绘了根据本文所示和描述的一个或多个实施例的使用真空耦合过程形成的说明性人造肌肉的分解视图;

[0010] 图2示意性地描绘了根据本文所示和描述的一个或多个实施例的图1的人造肌肉的俯视图;

[0011] 图3示意性地描绘了根据本文所示和描述的一个或多个实施例的在非致动状态下沿着图2中的线3-3截取的图1的人造肌肉的横截面视图;

[0012] 图4示意性地描绘了根据本文所示和描述的一个或多个实施例的在致动状态下沿着图2中的线3-3截取的图1的人造肌肉的横截面视图;

[0013] 图5A示意性地描绘了根据本文所示和描述的一个或多个实施例的层堆叠的横截面,该层堆叠包括定位在第一电极绝缘体和第一支撑聚合物之间的第一电极,第一层堆叠部署在真空袋中;

[0014] 图5B示意性地描绘了根据本文所示和描述的一个或多个实施例的第二层堆叠的横截面,该第二层堆叠包括定位在第二电极绝缘体和第二支撑聚合物之间的第二电极,第二层堆叠部署在真空袋中;

[0015] 图6示意性地描绘了根据本文所示和描述的一个或多个实施例的定位在真空袋中的图5A的第一层堆叠;

[0016] 图7示意性地描绘了根据本文所示和描述的一个或多个实施例的经历热密封过程的图5A和图6的第一层堆叠;

[0017] 图8示意性地描绘了根据本文所示和描述的一个或多个实施例的使用图5A-图7中描绘的过程形成的第一电极组件和第二电极组件;

[0018] 图9示意性地描绘了根据本文所示和描述的一个或多个实施例的定位在第一膜层和第二膜层之间的第一电极组件和第二电极组件的横截面;

[0019] 图10示意性地描绘了根据本文所示和描述的一个或多个实施例的处于非致动状态的另一种说明性人造肌肉的横截面视图;

[0020] 图11示意性地描绘了根据本文所示和描述的一个或多个实施例的处于致动状态的图11的人造肌肉的横截面视图;

[0021] 图12示意性地描绘了根据本文所示和描述的一个或多个实施例的另一种说明性人造肌肉的分解视图;

[0022] 图13示意性地描绘了根据本文所示和描述的一个或多个实施例的图12的人造肌肉的俯视图;

[0023] 图14示意性地描绘了根据本文所示和描述的一个或多个实施例的另一种人造肌肉的俯视图;以及

[0024] 图15示意性地描绘了根据本文所示和描述的一个或多个实施例的用于操作人造肌肉的致动系统。

具体实施方式

[0025] 本文描述的实施例针对人造肌肉和制造人造肌肉的方法。本文描述的制造人造肌肉的方法包括真空密封过程,这促进使用不能有效热密封的某些高性能电极绝缘体。不受理论限制,在介电弹性体致动器领域中,增加电绝缘聚合物(例如,本文描述的人造肌肉的电极绝缘体)的介电常数提高致动器性能。但是,高介电常数聚合物(诸如聚偏二氟乙烯(PVDF))不能有效地热密封到电极。虽然粘合剂层可以定位在高介电常数聚合物和电极之间,但包括粘合剂会引入串联电容复杂性。因此,形成其中电极绝缘体与电极真空耦合的人造肌肉促进使用高介电常数聚合物,从而提高人造肌肉的性能。本文更详细地描述人造肌肉的各种实施例和制造人造肌肉的方法。只要有可能,在所有附图中将使用相同的附图标记来指代相同或相像的部分。

[0026] 图1-4描绘了可以使用图5A-9中描绘的制造方法形成的人造肌肉101。特别地,图1-4中所示的人造肌肉101包括具有电极区域194和可扩展流体区域196的壳体110。包括第一电极106和第二电极108的电极对104定位在壳体110的电极区域194中,并且介电流体198容纳在壳体110内。在操作中,电极对104可在非致动状态与致动状态之间致动,使得从非致动状态到致动状态的致动将介电流体198指引到可扩展流体区域196中,从而使可扩展流体区域196膨胀,这可以提供致动力。此外,人造肌肉101包括真空耦合到第一电极106并与第一电极106直接接触的第一电极绝缘体111和真空耦合到第二电极108并与第二电极108直接接触的第二电极绝缘体112。但是,应当理解的是,具有第一电极绝缘体111而没有第二电极绝缘体112的实施例是预期的。如以下更详细描述,关于图5A-9,将第一电极绝缘体111真空耦合到第一电极106并且将第二电极绝缘体112真空耦合到第二电极108允许使用高介电聚合物材料(诸如PDVF)作为电极绝缘体,其不适合热密封,但增加了人造肌肉的致动性能。

[0027] 现在参考图1和2,人造肌肉101包括壳体110、耦合到壳体110的相对表面的电极对104(包括第一电极106和第二电极108)、固定到第一电极106的第一电极绝缘体111,以及固定到第二电极108的第二电极绝缘体112。特别地,第一电极绝缘体111与第一电极106直接接触地真空耦合到第一电极106,并且第二电极绝缘体112与第二电极108直接接触地真空耦合到第二电极108。在一些实施例中,壳体110是一体式整体层,其包括一对相对的内表面(诸如第一内表面114和第二内表面116),以及一对相对的外表面(诸如第一外表面118和第二外表面120)。在其它实施例中,壳体110可以是一对单独制造的膜层(诸如第一膜层122和第二膜层124)。因此,第一膜层122包括第一内表面114和第一外表面118,而第二膜层124包括第二内表面116和第二外表面120。壳体110的第一内表面114和第二内表面116是可热密封的。

[0028] 如图1中所示,人造肌肉101还可以包括定位在第一电极106和壳体110的第一内表面114之间的第一支撑聚合物103以及定位在第二电极108和壳体110的第二内表面116之间的第二支撑聚合物105。如本文所述,第一和第二支撑聚合物103、105有助于真空耦合过程,该过程允许使用高介电聚合物作为第一和第二电极绝缘体111、112。在一些实施例中,第一支撑聚合物103和第二支撑聚合物105一般包括相同的结构和组成。例如,在一些实施例中,第一支撑聚合物103和第二支撑聚合物105各自包括双轴定向的聚丙烯(BOPP)。

[0029] 虽然本文描述的实施例主要是指包括第一膜层122和第二膜层124的壳体110,这

与一件式壳体相反,但应当理解的是,任一种布置都是预期的。在一些实施例中,第一膜层122和第二膜层124一般包括相同的结构和组成。例如,在一些实施例中,第一膜层122和第二膜层124各自包括BOPP。

[0030] 第一电极106和第二电极108各自定位在第一膜层122和第二膜层124之间。在一些实施例中,第一电极106和第二电极108各自是铝涂层聚酯,诸如例如**Mylar®**,即,双轴定向的聚对苯二甲酸乙二醇酯(BoPET)。但是,应当理解的是,第一电极106和第二电极108可以包括其它电耦合材料(诸如铜、银、钛、铂等),其可以涂覆有聚酯(诸如**Mylar®**)。第一电极106和第二电极108可以包括柔性材料或非柔性材料(例如,刚性材料)并且在一些实施例中可以包括可拉伸材料。而且,其中第一电极106和第二电极108包括水凝胶材料的实施例是预期的。此外,第一电极106和第二电极108中的一个带负电的电极,而第一电极106和第二电极108中的另一个是带正电的电极。出于本文讨论的目的,任一电极106、108可以带正电,只要人造肌肉101的另一个电极106、108带负电即可。

[0031] 第一电极106具有面向膜的表面126和相对的内表面128。第一电极106定位成靠近第一膜层122,具体而言,第一膜层122的第一内表面114。即,第一电极106可以与第一膜层122的第一内表面114接触,或者与部署在第一电极106和第一膜层122的第一内表面114之间的第一支撑聚合物103接触。此外,第一电极106包括从第一电极106延伸经过第一膜层122的边缘的第一端子130,使得第一端子130可以连接到电源以致动第一电极106。具体而言,该端子或者直接或者串联耦合到致动系统400的电源和控制器,如图15中所示。类似地,第二电极108具有面向膜的表面148和相对的内表面150。第二电极108定位成靠近第二膜层124,具体而言,第二膜层124的第二内表面116。即,第二电极108可以与第二膜层124的第二内表面116接触,或者与部署在第二电极108和第二膜层124的第二内表面116之间的第二支撑聚合物105接触。第二电极108包括从第二电极108延伸经过第二膜层124的边缘的第二端子152,使得第二端子152可以连接到电源和致动系统400的控制器以致动第二电极108。

[0032] 第一电极106包括两个或更多个接线片(tab)部分132和两个或更多个桥接部分140。每个桥接部分140定位在相邻的接线片部分132之间,从而互连这些相邻的接线片部分132。每个接线片部分132具有从第一电极106的中心轴线C径向延伸到接线片部分132的相对的第二端136的第一端134,其中第二端136定义第一电极的外周界138的一部分106。每个桥接部分140具有从第一电极106的中心轴线C径向延伸到桥接部分140的相对的第二端144的第一端142,第二端144定义第一电极106的外周界138的另一个部分。每个接线片部分132具有接线片长度L1并且每个桥接部分140具有从第一电极106的中心轴线C在径向方向上延伸的桥接长度L2。接线片长度L1是从接线片部分132的第一端134到第二端136的距离,而桥接长度L2是从桥接部分140的第一端142到第二端144的距离。每个接线片部分132的接线片长度L1长于每个桥接部分140的桥接长度L2。在一些实施例中,桥接长度L2是接线片长度L1的20%到50%,诸如接线片长度L1的30%到40%。

[0033] 在一些实施例中,两个或更多个接线片部分132布置在一对或多对接线片部分132中。每对接线片部分132包括彼此对角线相对布置的两个接线片部分132。在一些实施例中,第一电极106可以仅包括定位在第一电极106的相对侧或相对端的两个接线片部分132。在一些实施例中,如图7中所示,第一电极106包括四个接线片部分132和互连相邻的接线片部

分132的四个桥接部分140。在这个实施例中，四个接线片部分132被布置为两对彼此对角线相对的接线片部分132。此外，如图所示，第一端子130从其中一个接线片部分132的第二端136延伸并与其一体形成。

[0034] 与第一电极106一样，第二电极108包括至少一对接线片部分154和两个或更多个桥接部分162。每个桥接部分162定位在相邻的接线片部分154之间，从而互连这些相邻的接线片部分154。每个接线片部分154具有从第二电极108的中心轴线C径向延伸到接线片部分154的相对的第二端158的第一端156，其中第二端158定义第二电极108的外周界160的一部分。由于第一电极106与第二电极108彼此同轴，因此第一电极106与第二电极108的中心轴线C相同。每个桥接部分162具有从第二电极的中心轴线C径向延伸到桥接部分162的相对的第二端166的第一端164，该第二端166定义第二电极108的外周界160的另一个部分。每个接线片部分154具有接线片长度L3并且每个桥接部分162具有从第二电极108的中心轴线C在径向方向上延伸的桥接长度L4。接线片长度L3是从接线片部分154的第一端156到第二端158的距离，而桥接长度L4是从桥接部分162的第一端164到第二端166的距离。接线片长度L3比每个桥接部分162的桥接长度L4长。在一些实施例中，桥接长度L4是接线片长度L3的20%到50%，诸如接线片长度L3的30%到40%。

[0035] 在一些实施例中，两个或更多个接线片部分154布置在一对或多对接线片部分154中。每对接线片部分154包括彼此对角线相对布置的两个接线片部分154。在一些实施例中，第二电极108可以仅包括定位在第一电极106的相对侧或相对端的两个接线片部分154。在一些实施例中，如图1和2中所示，第二电极108包括四个接线片部分154和互连相邻的接线片部分154的四个桥接部分162。在这个实施例中，四个接线片部分154被布置为彼此对角线相对的两对接线片部分154。此外，如图所示，第二端子152从接线片部分154之一的第二端158延伸并与其一体形成。

[0036] 现在参考图1-4，第一电极106和第二电极108中的至少一个具有形成在其中的中央开口，该中央开口位于接线片部分132的第一端134和桥接部分140的第一端142之间。在图3和4中，第一电极106具有中央开口146。但是，应当理解的是，当在第二电极108内提供中央开口时，第一电极106不需要包括中央开口146，如图10和11中所示。可替代地，当中央开口146在第一电极106内提供时，第二电极108不需要包括中央开口。仍然参考图1-4，第一电极绝缘体111和第二电极绝缘体112具有一般分别与第一电极106和第二电极108对应的几何形状。因此，第一电极绝缘体111和第二电极绝缘体112各自具有与第一电极106和第二电极108上的相像部分对应的接线片部分170、172和桥接部分174、176。但是，第一电极绝缘体111和第二电极绝缘体112各自具有外周界178、180，当定位在其上时，外周界178、180分别横向延伸超过第一电极106的外周界138和第二电极108的外周界160。这促进第一电极绝缘体111和第一支撑聚合物103之间以及第二电极绝缘体112和第二支撑聚合物105之间的耦合。但是，应当理解的是，其中第一电极绝缘体111和第二电极绝缘体112的外周界178、180分别与第一电极106的外周界138和第二电极108的外周界160对应的实施例是预期的。

[0037] 应当认识到的是，在一些实施例中，第一电极绝缘体111和第二电极绝缘体112一般包括相同的结构和组成。照此，在一些实施例中，第一电极绝缘体111和第二电极绝缘体112各自分别包括第一表面182、184和相对的第二表面186、188。在一些实施例中，第一电极绝缘体111和第二电极绝缘体112各自是分别真空耦合到第一电极106的内表面128和第二

电极108的内表面150的聚合物材料。例如,如本文更详细描述,第一电极绝缘体111和第二电极绝缘体112可以包括高介电常数聚合物。

[0038] 现在参考图2-4,人造肌肉101以其组装形式示出,其中第一电极106的第一端子130和第二电极108的第二端子152延伸经过壳体110的外周界(即,第一膜层122和第二膜层124)。如图2中所示,第二电极108堆叠在第一电极106的顶部,并且因此,第一电极106和第一膜层122未示出。以其组装形式,第一电极106、第二电极108、第一电极绝缘体111、第二电极绝缘体112、第一支撑聚合物103和第二支撑聚合物105被夹在第一膜层122和第二膜层124之间。第一膜层122在包围第一电极106的外周界138和第二电极108的外周界160的区域处部分地密封到第二膜层124。在一些实施例中,第一膜层122热密封到第二膜层124。具体而言,在一些实施例中,第一膜层122被密封到第二膜层124以定义包围第一电极106和第二电极108的密封部分190。第一膜层122和第二膜层124可以以任何合适的方式密封,诸如使用粘合剂、热密封等。

[0039] 第一电极106、第二电极108、第一电极绝缘体111、第二电极绝缘体112、第一支撑聚合物103和第二支撑聚合物105提供了阻止第一膜层122密封到第二膜层124从而形成未密封部分192的屏障。密封部分190包围未密封部分192。壳体110的未密封部分192包括其中提供电极对104的电极区域194和被电极区域194包围的可扩展流体区域196。第一电极106和第二电极108的中央开口146、168形成可扩展流体区域196并且被布置为彼此轴向堆叠。虽然未示出,但是壳体110可以被切割以符合电极对104的几何形状并且减小人造肌肉101的尺寸(即,密封部分190的尺寸)。

[0040] 介电流体198在未密封部分192内提供并且在第一电极106和第二电极108之间自由流动。如本文所使用的,“介电”流体是在没有传导的情况下传输电力并且因此具有低电导率的介质或材料。一些非限制性示例介电流体包括全氟烷烃、变压器油和去离子水。应当认识到的是,介电流体198可以使用针或其它合适的注射设备被注射到人造肌肉101的未密封部分192中。

[0041] 现在参考图3和4,人造肌肉101可在非致动状态与致动状态之间被致动。在非致动状态下,如图9中所示,第一电极106和第二电极108在其中央开口146、168和接线片部分132、154的第一端134、156附近彼此部分间隔开。由于壳体110在第一电极106的外周界138和第二电极108的外周界160处被密封,因此接线片部分132、154的第二端136、158相对于彼此保持就位。在致动状态下,如图10中所示,第一电极106和第二电极108彼此接触并彼此平行定向,以迫使介电流体198进入可扩展流体区域196。这使得介电流体198流过第一电极106和第二电极108的中央开口146、168并且使可扩展流体区域196膨胀。

[0042] 现在参考图3,人造肌肉101被示为处于非致动状态。电极对104在壳体110的未密封部分192的电极区域194内提供。第一电极106的中央开口146和第二电极108的中央开口168在可扩展流体区域196内同轴对准。在非致动状态下,第一电极106和第二电极108彼此部分地间隔开且不平行。由于第一膜层122在电极对104周围被密封到第二膜层124,因此接线片部分132、154的第二端136、158彼此靠近或接触。因此,介电流体198被提供在第一电极106和第二电极108之间,从而分离接线片部分132、154的靠近可扩展流体区域196的第一端134、156。换句话说,第一电极106的接线片部分132的第一端134与第二电极108的接线片部分154的第一端156之间的距离大于第一电极106的接线片部分132的第二端136与第二电极

108的接线片部分154的第二端158之间的距离。这导致电极对104在被致动时朝着可扩展流体区域196拉上。在一些实施例中,第一电极106和第二电极108可以是柔性的。第一电极106和第二电极108可以是凸的,使得它们的接线片部分132、154的第二端136、158可以保持彼此靠近,但在靠近中央开口146、168附近彼此间隔开。在非致动状态下,可扩展流体区域196具有第一高度H1。

[0043] 如图4中所示,当被致动时,第一电极106和第二电极108从其接线片部分132、154的第二端144、158朝着彼此拉上,从而将介电流体198推入可扩展流体区域196。如图所示,当处于致动状态时,第一电极106和第二电极108彼此平行。在致动状态下,介电流体198流入可扩展流体区域196以使可扩展流体区域196膨胀。照此,第一膜层122与第二膜层124在相反的方向扩展。在致动状态下,可扩展流体区域196具有第二高度H2,其大于在非致动状态下可扩展流体区域196的第一高度H1。虽然未示出,但应当注意的是,电极对104可以被部分地致动到非致动状态和致动状态之间的位置。这将允许可扩展流体区域196的部分膨胀和必要时的调整。

[0044] 为了使第一电极106和第二电极108朝着彼此移动,由电源(诸如图15的电源480)施加电压。在一些实施例中,可以从电源提供高达10kV的电压以通过介电流体198感应电场。第一电极106和第二电极108之间产生的吸引力将介电流体198推入可扩展流体区域196。来自可扩展流体区域196内的介电流体198的压力使得第一膜层122、第一支撑聚合物103和第一电极绝缘体111在沿着第一电极106的中心轴线C的第一轴向方向上变形并且使得第二膜层124、第二支撑聚合物105和第二电极绝缘体112在沿着第二电极108的中心轴线C的相反的第二轴向方向上变形。一旦中断供给第一电极106和第二电极108的电压,第一电极106和第二电极108就返回到它们非致动状态下的初始非平行位置。

[0045] 应当认识到的是,本文公开的人造肌肉101的当前实施例,具体而言,具有互连桥部分174、176的接线片部分132、154,提供了对不包括接线片部分132、154的致动器的许多改进,诸如由E. Acome、S. K. Mitchell、T. G. Morrissey、M. B. Emmett、C. Benjamin、M. King、M. Radakovitz和C. Keplinger在标题为“Hydraulically amplified self-healing electrostatic actuators with muscle-like performance”的论文中描述的液压放大自愈式静电(HASEL)致动器(Science 2018年1月5日:第359卷,第6371期,第61-65页)。与包括具有均匀径向延伸宽度的甜甜圈形电极的已知HASEL致动器相比,分别在第一电极106和第二电极108中的每一个上包括两对接线片部分132、154的人造肌肉101的实施例减少了人造肌肉101的总质量和厚度、减少了致动期间所需的电压量,并且减少了人造肌肉101的总体积而不减少致动之后产生的力的量。更特别地,与包括甜甜圈形电极的HASEL致动器相比,人造肌肉101的接线片部分132、154通过提供人造肌肉101的局部且均匀的液压致动而提供导致增加的致动功率的拉链前部。具体而言,与甜甜圈形HASEL致动器相比,一对接线片部分132、154提供两倍于每单位体积的致动器功率量,而两对接线片部分132、154提供四倍于每单位体积的致动器功率量。互连接线片部分132、154的桥接部分174、176还通过在致动期间维持相邻的接线片部分132、154之间的距离来限制接线片部分132、154的弯曲。因为桥接部分174、176与接线片部分132、154一体形成,所以桥接部分174、176还通过消除提供增加的破裂风险的附接位置来防止接线片部分132、154之间的泄漏。

[0046] 在操作中,当人造肌肉101被致动时,可扩展流体区域196的扩展产生每立方厘米

(cm^3) 致动器体积3牛顿-毫米(N.mm)或更大的力,诸如 $6\text{N}\cdot\text{mm}/\text{cm}^3$ 或更大、 $10\text{N}\cdot\text{mm}/\text{cm}^3$ 或更大、 $15\text{N}\cdot\text{mm}/\text{cm}^3$ 或更大、 $25\text{N}\cdot\text{mm}/\text{cm}^3$ 或更大、 $50\text{N}\cdot\text{mm}/\text{cm}^3$ 或更大、 $100\text{N}\cdot\text{mm}/\text{cm}^3$ 或更大,等等。实际上,不打算受理论限制,增加第一电极绝缘体111和第二电极绝缘体112的介电常数导致人工肌肉101可实现的致动力的对应增加。即,第一电极绝缘体111和第二电极绝缘体112的介电常数与人造肌肉101可达到的驱动力具有线性关系,使得第一电极绝缘体111和第二电极绝缘体112的介电常数加倍使人造肌肉101可实现的驱动力翻倍。

[0047] 而且,第一电极106和第二电极108的尺寸与介电流体198的位移量成比例。因此,当期望可扩展流体区域196内的更大位移时,电极对104的尺寸相对于可扩展流体区域196的尺寸增加。应当认识到的是,可扩展流体区域196的尺寸由第一电极106和第二电极108中的中央开口146、168定义。因此,可扩展流体区域196内的位移的程度可以可替代地或附加地通过增加或减小中央开口146、168的尺寸来控制。

[0048] 现在参考图5A-9,将描绘制造人造肌肉(诸如图1-4的人造肌肉101)的方法,包括真空耦合过程以将电极(诸如第一电极106)直接耦合到诸如第一电极绝缘体111之类的电极绝缘体。图5A和5B描绘了包括可以分别形成第一电极组件40A和第二电极组件40B的材料层的第一层堆叠30A和第二层堆叠30B的示意性横截面(图8和9)。第一电极组件40A和第二电极组件40B可以被用于形成图1-4的人造肌肉101,或其它人造肌肉(诸如下文关于图10-14描述的人造肌肉201、300、300')。第一层堆叠30A包括定位在第一电极绝缘体111和第一支撑聚合物103之间的第一电极106,第一电极绝缘体111和第一支撑聚合物103经历真空密封过程和热密封过程以形成第一电极组件40A。第二层堆叠30B包括定位在第二电极绝缘体112和第二支撑聚合物105之间的第二电极108,第二电极绝缘体112和第二支撑聚合物105经历真空密封过程和热密封过程以形成第二电极组件40B。

[0049] 第一电极绝缘体111和第二电极绝缘体112可以各自包括高介电常数聚合物。如本文所使用的,高介电常数聚合物是介电常数为3或更大的聚合物。在一些实施例中,高介电常数聚合物可以包括6或更大的介电常数。高介电常数聚合物可以包括卤代聚合物,例如,诸如PVDF之类的氟聚合物聚合物。不受理论限制,含有VDF(偏二氟乙烯)单体的聚合物通常具有高介电常数。PVDF聚合物的示例包括PVDF均聚物、P(VDF-HFP)(六氟丙烯)共聚物、P(VDF-CTFE)(三氟氯乙烯)共聚物、P(VDF-TFE)(四氟乙烯)共聚物、P(TFE-HFP-VDF)三元共聚物、P(VDF-TrFE)共聚物。附加的高介电聚合物包括高介电常数三元共聚物,诸如P(VDF-TrFE-CFE)和P(VDF-TrFE-CTFE)三元共聚物,它们具有20至50的的介电常数。还有其它高介电常数聚合物包括含氟聚合物热塑性弹性体,其包括物理交联的、化学可交联的含氟聚合物和铁电聚合物。虽然本文描述的方法有效克服了高介电常数聚合物的制造困难,但应当理解的是,本文描述的方法可以被用于形成具有多种电极绝缘聚合物的人造肌肉,包括介电常数低于3的聚合物。

[0050] 此外,第一支撑聚合物103和第二支撑聚合物105各自包括分别横向延伸超过第一电极106和第二电极108的悬垂部分35。悬垂部分35促进电极绝缘体111、112和支撑聚合物103、105之间的直接接触。一旦电极绝缘体111、112真空耦合到相应的第一电极106和第二电极108,这就允许支撑聚合物103、105的悬垂部分35热密封到电极绝缘体111、112。

[0051] 现在参考图6,第一层堆叠30A被示为定位在真空袋10中。真空袋10包括具有用于将管14连接到真空袋10的开口的管连接器12,如图6中所示。管14还连接到流体泵16。因此,

流体泵16使用管14流体耦合到真空袋10。在操作中,流体泵16被配置为从真空袋10去除空气,从而将第一层堆叠30A的第一电极106真空耦合到第一电极绝缘体111。不受理论限制,第一电极106和第一电极绝缘体111都包括微米级的一些表面缺陷。一旦空气已经从真空袋10中去除并且因此也从第一电极106和第一电极绝缘体111之间的界面去除,持久的真空就被保持在第一电极106和第一电极绝缘体111之间的界面处由于在第一电极106和第一电极绝缘体111两者上都存在表面缺陷而造成的微米级间隙中。保持在第一电极106和第一电极绝缘体111之间的持久真空允许第一电极106和第一电极绝缘体111在从真空袋10去除之后保持真空耦合。

[0052] 应当理解的是,第二层堆叠30B可以类似地真空耦合以在第二层堆叠30B的第二电极108和第二电极绝缘体112之间保持持久真空。在一些实施例中,第一层堆叠30A和第二层堆叠30B两者在真空密封操作期间可以一起定位在真空袋10中,而在其它实施例中,第一层堆叠30A和第二层堆叠30B可以分开真空密封。而且,虽然本文描述的真空耦合技术促进使用高介电常数聚合物作为第一和第二电极绝缘体111、112,但这些技术还促进第一和第二电极绝缘体111、112与相应的第一和第二电极106、108之间的紧密、均匀接触,这进一步提高了人造肌肉的性能。

[0053] 现在参考图7,描绘使用热密封设备18的热密封过程。图5A和5B的第一层堆叠30A和第二层堆叠30B可以在定位在真空袋10中并且在从真空袋10去除空气的同时被热密封。在一些实施例中,第一层堆叠30A和第二层堆叠30B二者在热密封操作期间可以一起定位在真空袋10中,而在其它实施例中,第一层堆叠30A和第二层堆叠30B可以分开热密封。在操作中,热密封第一和第二层堆叠30A、30B将第一和第二支撑聚合物103、105密封(即,热密封)到相应的第一和第二电极106、108。因此,在从真空袋10去除第一和第二层堆叠30A、30B中的每一个后,第一支撑聚合物103和第二支撑聚合物105可以分别耦合到第一电极106和第二电极108。而且,第一和第二支撑聚合物103、105的悬垂部分35可以分别与第一和第二电极绝缘体111、112直接接触。在热密封过程期间,第一支撑聚合物103的悬垂部分35可以热密封到第一电极绝缘体111并且第二支撑聚合物105的悬垂部分35可以热密封到第二电极绝缘体112。实际上,虽然第一和第二电极绝缘体111、112可以包括不能有效地热密封到电极的高介电聚合物,但支撑聚合物103、105的材料(例如,BOPP)适合热密封,从而促进第一和第二支撑聚合物103、105的悬垂部分35分别到第一和第二电极绝缘体111、112的耦合。因此,在从真空袋10去除第一和第二层堆叠30A、30B中的每一个后,第一和第二支撑聚合物103分别耦合到第一和第二电极106、108以及第一和第二电极绝缘体111,112。

[0054] 现在参考图8,描绘第一电极组件40A和第二电极组件40B。第一电极组件40A和第二电极组件40B使用以上关于图5-7描述的真空密封和热密封过程形成。例如,第一电极组件40A通过真空密封和热密封第一层堆叠30A形成,而第二电极组件40B通过真空密封和热密封第二层堆叠30B形成。实际上,在去除真空袋10的第一和第二层堆叠30A、30B后,每个电极106、108保持真空耦合到相应的电极绝缘体111、112并且层堆叠30A和30B现在包括第一电极组件40A和第二电极组件40B。

[0055] 再次参考图5A和5B,第一热释放层50和第二热释放层52可以定位在真空袋10中以帮助本文所述方法的真空密封和热密封过程。在图5A中,第一热释放层50定位在第一电极绝缘体111和真空袋10之间,而第二热释放层52定位在第一支撑聚合物103和真空袋10之

间。在图5B中,第一热释放层50定位在第二电极绝缘体112和真空袋10之间,而第二热释放层52定位在第二支撑聚合物105和真空袋10之间。实际上,第一和第二热释放层50、52定位在每个层堆叠30A、30B的相对侧上。在操作中,第一热释放层50和第二热释放层52防止层堆叠30A、30B在真空密封和热密封步骤期间耦合到真空袋10。在热密封步骤之后,可以将第一和第二热释放层50、52从与层堆叠30A、30B的接触中去除。第一和第二热释放层50、52包括具有有限质地的材料,诸如纤维树脂或纸。此外,第一和第二热释放层50、52可以包括允许一些气流通过多孔材料的多孔材料。

[0056] 现在参考图8和9,第一电极组件40A和第二电极组件40B可以被用于形成人造肌肉(诸如图1-4的人造肌肉101)。图8示意性地描绘了定位在第一膜层122和第二膜层124之间的第一电极组件40A和第二电极组件40B的横截面。具体地,为了形成人造肌肉101,一旦制造了第一电极组件40A和第二电极组件40B,第一电极组件40A和第二电极组件40B就可以以堆叠布置放置第一膜层122和第二膜层124之间。在堆叠布置中,第一电极组件40A的第一电极绝缘体111面对第二电极组件40B的第二电极绝缘体112,第一电极组件40A的第一支撑聚合物103面对第一膜层122,并且第二电极组件40B的第二支撑聚合物105面对第二膜层124。

[0057] 为了形成人造肌肉(诸如图1-4的第一人造肌肉101),将第一膜层122密封到第二膜层124以形成容纳第一和第二电极组件40A的壳体110、40B。将第一膜层122热密封到第二膜层124也可以将第一和第二膜层122、124分别热密封到第一和第二电极组件40A、40B的第一和第二支撑聚合物103、105。此外,将第一膜层122密封到第二膜层124定义壳体110的密封部分190,其包围由壳体110的密封部分190包围的未密封部分192。一旦第一电极组件40A被密封到第二电极组件40B以形成人造肌肉101,介电流体198(图1-4)就可以被注入到第一电极组件40A和第二电极组件40B之间的人造肌肉中。

[0058] 现在参考图10和11,图示了可以使用图5A-9的方法形成的人造肌肉201的另一个实施例。人造肌肉201与人造肌肉101基本相似。照此,相像的结构用相同的附图标记表示。但是,如图所示,第一电极106不包括中央开口。因此,只有第二电极108包括形成在其中的中央开口168。如图10中所示,人造肌肉201处于非致动状态,第一电极106是平面的,而第二电极108相对于第一电极106是凸的。在非致动状态下,可扩展流体区域196具有第一高度H3。在致动状态下,如图11中所示,可扩展流体区域196具有第二高度H4,其大于第一高度H3。应当认识到的是,通过仅在第二电极108中而不是在第一电极106和第二电极108中都提供中央开口168,可以在人造肌肉201的一侧上形成总变形。此外,因为总变形仅在人造肌肉201的一侧形成,所以当介电流体的所有其它维度、朝向和体积相同时,人造肌肉201的可扩展流体区域196的第二高度H4比人造肌肉101的可扩展流体区域196的第二高度H2从垂直于人造肌肉201的中心轴线C的纵向轴线延伸得更远。

[0059] 如图12-14中所示,图示了可以使用图5A-9的方法形成的人造肌肉300的另一个实施例。应当认识到的是,人造肌肉300包括与人造肌肉101(图1)相似的结构,因此在操作上与人造肌肉101(图1)相似。值得注意的是,人造肌肉300包括扇形部分332来代替关于人造肌肉101(图1)所讨论的接线片部分132(图1)。但是,应当理解的是,人造肌肉300的扇形部分332和接线片部分132各自一般是人造肌肉的电极的径向延伸部分,定位在桥接部分附近,并提供拉链功能性,如上面关于人造肌肉101和201所描述的,并且下面关于人造肌肉

300进行描述。实际上,这些径向延伸部分(例如,接线片部分和扇形部分)各自提供增加的每单位体积的致动器功率,同时最小化操作期间的屈曲和破裂。

[0060] 现在参考图12和13,人造肌肉300包括壳体302、固定到壳体302的相对表面的电极对304(包括第一电极306和第二电极308)、固定到第一电极306的第一电极绝缘体310,以及固定到第二电极308的第二电极绝缘体312。在一些实施例中,壳体302是一件式整体层,包括一对相对的内表面(诸如第一内表面314和第二内表面316),以及一对相对的外表面(诸如第一外表面318和第二外表面320)。在一些实施例中,壳体302的第一内表面314和第二内表面316是可热密封的。在其它实施例中,壳体302可以是一对单独制造的膜层(诸如第一膜层322和第二膜层324)。因此,第一膜层322包括第一内表面314和第一外表面318,而第二膜层324包括第二内表面316和第二外表面320。

[0061] 在随后的描述中,可以参考包括第一膜层322和第二膜层324的壳体302,而不是一体式壳体。应当理解的是,任一种布置都是预期的。在一些实施例中,第一膜层322和第二膜层324一般包括相同的结构和组成。例如,在一些实施例中,第一膜层322和第二膜层324各自包括BOPP。

[0062] 如图12中所示,人造肌肉300还可以包括定位在第一电极306和壳体302的第一内表面314之间的第一支撑聚合物303以及定位在第二电极308和壳体302的第二内表面316之间的第二支撑聚合物305。如上所述,第一和第二支撑聚合物303、305有助于真空耦合过程,该过程允许使用高介电聚合物作为第一和第二电极绝缘体310、312。在一些实施例中,第一支撑聚合物303和第二支撑聚合物305一般包括相同的结构和组成。例如,在一些实施例中,第一支撑聚合物303和第二支撑聚合物305各自包括BOPP。

[0063] 第一电极306和第二电极308各自定位在第一膜层322和第二膜层324之间。在一些实施例中,第一电极306和第二电极308各自是铝涂层聚酯,诸如例如**Mylar®**。但是,应当理解的是,第一电极306和第二电极308可以包括其它电耦合材料(诸如铜、银、钛、铂等),其可以涂覆有聚酯(诸如**Mylar®**)。第一电极306和第二电极308可以包括柔性材料或非柔性材料(例如,刚性材料),并且在一些实施例中可以包括可拉伸材料。而且,其中第一电极306和第二电极308包括水凝胶材料的实施例是预期的。而且,其中第一电极306和第二电极308中的一个带负电的电极,而第一电极306和第二电极308中的另一个带正电的电极。出于本文讨论的目的,电极306、308中的任一个可以带正电,只要人造肌肉300的另一个电极306、308带负电即可。

[0064] 第一电极306具有面向膜的表面326和相对的内表面328。第一电极306靠近第一膜层322(具体而言,靠近第一膜层322的第一内表面314)定位。即,第一电极306可以与第一膜层322的第一内表面314接触或与部署在第一电极306和第一膜层322的第一内表面314之间的第一支撑聚合物303接触。此外,第一电极306包括从第一电极306延伸经过第一膜层322的边缘的第一端子330,使得第一端子330可以连接到电源以致动第一电极306。具体而言,端子或者直接或者串联耦合到致动系统400的电源和控制器(图15)。类似地,第二电极308具有面向膜的表面348和相对的内表面350。第二电极308靠近第二膜层324(具体而言,靠近第二膜层324的第二内表面316)定位。即,第二电极308可以与第二膜层324的第二内表面316接触或者与部署在第二电极308和第二膜层324的第二内表面316之间的第二支撑聚合物305接触。第二电极308包括从第二电极308延伸经过第二膜层324的边缘的第二端子352,

使得第二端子352可以连接到致动系统400(图15)的控制器和电源以致动第二电极308。

[0065] 现在关于第一电极306,第一电极306包括从人造肌肉300的中心轴线C径向延伸的两个或更多个扇形部分332。在一些实施例中,第一电极306仅包括定位在第一电极306的相对侧或相对端的两个扇形部分332。在一些实施例中,第一电极306包括多于两个扇形部分332,诸如三个、四个或五个扇形部分332。在其中第一电极306包括偶数个扇形部分332的实施例中,扇形部分332可以布置为两对或更多对扇形部分332。如图12中所示,第一电极306包括四个扇形部分332。在这个实施例中,四个扇形部分332布置为两对扇形部分332,其中每对的两个独立扇形部分332彼此对角线相对。

[0066] 每个扇形部分332具有第一侧边332a和相对的第二侧边332b。如图所示,第一端子330从扇形部分332之一的第二端336延伸并与其一体形成。通道333至少部分地由相邻的扇形部分332的相对的侧边332a、332b定义并且因此朝着中心轴线C径向延伸。通道333终止于互连相邻的扇形部分332的桥接部分340的端部340a。

[0067] 如图12中所示,包括分割线D以描绘扇形部分332和桥接部分340之间的边界。分割线D由扇形部分332的侧边332a、332b延伸到扇形部分332的与侧边332a、332b共线的第一端334。应当理解的是,为了清楚起见,图13中示出了分割线D,并且扇形部分332与桥接部分340是一体的。在相邻的桥接部分340之间延伸的扇形部分332的第一端334定义扇形部分332的内部长度。由于扇形部分332的几何形状在第一侧边332a和第二侧边332b之间朝着中心轴线C逐渐变细,因此扇形部分332的第二端336定义扇形部分332的外部长度,该外部长度大于扇形部分332的内部长度。

[0068] 而且,每个扇形部分332具有由第二端336与扇形部分332的第一侧边332a和第二侧边332b中的每一个的相交定义的一对拐角332c。在实施例中,拐角332c以等于或小于90度的角度形成。在其它实施例中,拐角332c以锐角形成。

[0069] 如图12中所示,每个扇形部分332具有由扇形部分332的第一端334和扇形部分332的第二端336之间沿着第一侧边332a和与第一侧边332a共线的分割线D定义的第一边长。每个扇形部分332还具有由扇形部分332的第一端334和扇形部分332的第二端336之间沿着第二侧边332b和与第二侧边332b共线的分割线D定义的第二边长。在实施例中,扇形部分332的第一边长大于第二边长,使得第一电极306具有椭圆体几何形状。

[0070] 每个扇形部分332的第二端336、第一侧边332a和第二侧边332b以及互连扇形部分332的桥接部分340定义第一电极306的外周界338。在实施例中,中央开口346形成在第一电极306内扇形部分332和桥接部分340之间,并且与中心轴线C同轴。每个扇形部分332具有从中央开口346的周界342延伸到扇形部分332的第二端336的扇形长度。每个桥接部分340具有从中央开口346的周界342延伸到桥接部分340的端部340a的桥接长度,即,通道333。如图所示,每个桥接部分340的桥接长度基本上彼此相等。每个通道333具有由桥接部分340的端部340a和扇形部分332的第二端之间的距离定义的通道长度。由于每个桥接部分340的桥接长度基本上彼此相等且扇形部分332的第一边长大于扇形部分332的第二边长,因此第一对相对通道333具有大于第二对相对通道333的通道长度的通道长度。如图所示,在相邻的扇形部分332的相对侧边332a、332b之间延伸的通道333的宽度由于相对侧边332a、332b基本上彼此平行而保持基本上恒定。

[0071] 在实施例中,中央开口346具有2厘米(cm)至5cm的半径。在实施例中,中央开口346

具有3cm至4cm的半径。在实施例中,每个扇形部分332的总扇形面积等于或大于中央开口346面积的两倍。应当认识到的是,扇形部分332的扇形总面积与中央开口346的面积的比率直接与第一膜层322在人工肌肉300被致动时的偏转总量相关。在实施例中,桥接长度是扇形长度的20%至50%。在实施例中,桥接长度是扇形长度的30%至40%。在其中第一电极306不包括中央开口346的实施例中,扇形长度和桥接长度可以从与中心轴线C同轴的假想圆的周长测量。

[0072] 与第一电极306类似,第二电极308包括从人造肌肉300的中心轴线C径向延伸的两个或更多个扇形部分354。第二电极308包括与第一电极306基本相同的结构,因此包括相同数量的扇形部分354。具体而言,第二电极308被示为包括四个扇形部分354。但是,应当认识到的是,第二电极308可以包括任何合适数量的扇形部分354。

[0073] 第二电极308的每个扇形部分354具有第一侧边354a和相对的第二侧边354b。如图所示,第二端子352从扇形部分354之一的第二端358延伸并与其一体形成。通道355至少部分地由相邻的扇形部分354的相对侧边354a、354b定义并且因此朝着中心轴线C径向延伸。通道355终止于互连相邻的扇形部分354的桥接部分362的端部362a。

[0074] 如图12中所示,包括附加的分割线D以描绘扇形部分354和桥接部分362之间的边界。分割线D从扇形部分354的侧边354a、354b延伸至扇形部分354的与侧边354a、354b共线的第一端356。应当理解的是,为了清楚起见,图13中示出了分割线D,并且扇形部分354与桥接部分362是一体的。在相邻的桥接部分362之间延伸的扇形部分354的第一端356定义扇形部分354的内部长度。由于扇形部分354的几何形状在第一侧边354a和第二侧边354b之间朝着中心轴线C逐渐变细,因此扇形部分354的第二端358定义扇形部分354的外部长度,该外部长度大于扇形部分354的内部长度。

[0075] 而且,每个扇形部分354具有由第二端358与扇形部分354的第一侧边354a和第二侧边354b中的每一个的相交定义的一对拐角354c。在实施例中,拐角354c以等于或小于90度的角度形成。在其它实施例中,拐角354c以锐角形成。在人造肌肉300的致动期间,第一电极306的拐角332c和第二电极308的拐角354c被配置为与第一电极306和第二电极308的其余部分相比在较低的电压下彼此吸引。因此,最初在拐角332c、354c处的人造肌肉300的致动导致第一电极306的外周界338和第二电极308的外周界360在较低的电压下彼此吸引并降低在人造肌肉300致动之后在第一电极306和第二电极308之间形成气穴或空隙的可能性。

[0076] 如图12和13中所示,在实施例中,每个扇形部分354的第一侧边354a具有由扇形部分354的第一端356和扇形部分354的第二端358之间沿着第一侧边354a和与第一侧边354a共线的分割线D的距离定义的第一边长。每个扇形部分354还具有由扇形部分354的第一端356和扇形部分354的第二端358之间沿着第二侧边354b和与第二侧边354b共线的分割线D的距离定义的第二边长。在实施例中,扇形部分354的第一边长大于第二边长,使得第二电极308具有与第一电极306的几何形状对应的椭圆几何形状。

[0077] 每个扇形部分354的第二端358、第一侧边354a和第二侧边354b以及互连扇形部分354的桥接部分362定义第二电极308的外周界360。在实施例中,中央开口368形成在第二电极308内扇形部分354和桥接部分362之间,并且与中心轴线C同轴。每个扇形部分354具有从中心开口368的周界364延伸到扇形部分354的第二端358的扇形长度。每个桥接部分362具

有从中央开口368延伸到桥接部分362的端部362a的桥接长度,即,通道355。如图所示,每个桥接部分362的桥接长度基本上彼此相等。每个通道355具有由桥接部分362的端部362a和扇形部分354的第二端之间的距离定义的通道长度。由于每个桥接部分362的桥接长度基本上彼此相等并且扇形部分354的第一边长大于扇形部分354的第二边长,因此第一对相对通道355具有大于第二对相对通道355的通道长度的通道长度。如图所示,在相邻的扇形部分354的相对侧边354a、354b之间延伸的通道355的宽度由于相对侧边354a、354b基本上彼此平行而保持基本上恒定。

[0078] 在实施例中,中央开口368具有2cm至5cm的半径。在实施例中,中央开口368具有3cm至4cm的半径。在实施例中,每个扇形部分354的总扇形面积等于或大于中央开口368的面积的两倍。应当认识到的是,扇形部分354的总扇形面积与中央开口368的面积之间的比率直接与致动人造肌肉300时第二膜层324的总偏转量相关。在实施例中,桥接长度是扇形长度的20%至50%。在实施例中,桥接长度是扇形长度的30%至40%。在其中第二电极308不包括中央开口368的实施例中,可以从与中心轴线C同轴的假想圆的周界测量扇形长度和桥接长度。

[0079] 如本文所述,第一电极306和第二电极308各自具有与中心轴线C同轴的中央开口346、368。但是,应当理解的是,当中央开口368在第二电极308内提供时,第一电极306不需要包括中央开口346。可替代地,当中央开口346在第一电极306内提供时,第二电极308不需要包括中央开口368。

[0080] 再次参考图12,第一电极绝缘体310和第二电极绝缘体312具有分别与第一电极306和第二电极308的几何形状对应的基本上椭圆形几何形状。因此,第一电极绝缘体310和第二电极绝缘体312各自具有与第一电极306和第二电极308上的相像部分对应的扇形部分370、372和桥接部分374、376。但是,当定位在其上时,第一电极绝缘体310和第二电极绝缘体312各自具有分别横向延伸超过第一电极306的外周界338和第二电极308的外周界360的外周界378、380。这促进第一电极绝缘体310和第一支撑聚合物303之间以及第二电极绝缘体312和第二支撑聚合物305之间的耦合。但是,应当理解的是,其中当定位在其上时第一电极绝缘体310和第二电极绝缘体312的外周界378、380分别与第一电极306的外周界338和第二电极308的外周界360预期的实施例是预期的。

[0081] 应当认识到的是,在一些实施例中,第一电极绝缘体310和第二电极绝缘体312一般包括相同的结构和组成。照此,在一些实施例中,第一电极绝缘体310和第二电极绝缘体312各自分别包括第一表面382、384和相对的第二表面386、388。在一些实施例中,第一电极绝缘体310和第二电极绝缘体312各自是分别真空耦合到第一电极306的内表面328和第二电极308的内表面350的聚合物材料。例如,第一电极绝缘体310和第二电极绝缘体312可以包括高介电常数聚合物。

[0082] 现在参考图13,人造肌肉300以其组装形式示出,其中第一电极306的第一端子330和第二电极308的第二端子352延伸超过壳体302的外周界,即第一膜层322(图12)和第二膜层324。第二电极308堆叠在第一电极306的顶部,因此,第一膜层322(图12)未示出。现在参考图12和13,以其组装形式,第一电极306、第二电极308、第一电极绝缘体310、第二电极绝缘体312、第一支撑聚合物303和第二支撑聚合物305夹在第一膜层322和第二膜层324之间。第一膜层322在包围第一电极306的外周界338和第二电极308的外周界360的区域处部分地

密封到第二膜层324。在一些实施例中，第一膜层322热密封到第二膜层324。具体而言，在一些实施例中，第一膜层322被密封到第二膜层324以定义包围第一电极306和第二电极308的密封部分390。第一膜层322(图12)和第二膜层324可以任何合适的方式密封，诸如使用粘合剂、热密封、真空密封等。

[0083] 仍然参考图12和13，第一电极306、第二电极308、第一电极绝缘体310和第二电极绝缘体312、第一支撑聚合物303和第二支撑聚合物305提供了防止第一膜层322密封到第二膜层324的屏障，从而形成未密封部分392。壳体302的未密封部分392包括其中提供电极对304的电极区域394和被电极区域394包围的可扩展流体区域396。第一电极306和第二电极308的中央开口346、368定义可扩展流体区域396并且被布置为彼此轴向堆叠。虽然未示出，但壳体302可以被切割以符合电极对304的几何形状并减小人造肌肉300的尺寸(即，密封部分390的尺寸)。介电流体在未密封部分392内提供并且在第一电极306和第二电极308之间自由流动。

[0084] 现在参考图14，图示了人造肌肉300'的替代实施例。应当认识到的是，人造肌肉300'类似于本文所述的人造肌肉300。照此，相像的结构用相像的附图标记表示。与本文所述的人造肌肉300的第一电极306和第二电极308的椭圆几何形状相对，人造肌肉300'的第一电极306和第二电极308具有圆形几何形状。如图14中所示，对于第二电极308，第一侧边354a的第一侧边长度等于第二侧边354b的第二侧边长度。因而，形成在扇形部分354的相对侧边354a、354b之间的通道355每个都具有相等的长度。虽然第一电极306在图15中被第二电极308从视图中隐藏，但是应当认识到的是，第一电极306还具有与第二电极308的几何形状对应的圆形几何形状。

[0085] 现在参考图12和13，将讨论人造肌肉300的致动。在非致动状态下，第一电极306和第二电极308在其中央开口346、368和扇形部分332、354的第一端334、356附近彼此部分地间隔开。由于壳体302在第一电极306的外周界338和第二电极308的外周界360处被密封，因此扇形部分332、354的第二端336、358相对于彼此保持就位。这在图3中关于以相同方式操作的人造肌肉101进行了描绘。在致动状态下，使第一电极306和第二电极308彼此接触并且彼此平行定向以迫使介电流体398进入可扩展流体区域396。这使得介电流体398流过第一电极306和第二电极308的中央开口346、368并且使可扩展流体区域396膨胀。这在图4中关于以相同方式操作的人造肌肉101进行了描绘。

[0086] 在非致动状态下，第一电极306的扇形部分332的第一端334与第二电极308的扇形部分354的第一端356之间的距离大于第一电极306的扇形部分332的第二端336与第二电极308的扇形部分354的第二端358之间的距离。这导致电极对304在被致动时朝着可扩展流体区域396拉上。当被致动时，第一电极306和第二电极308从其扇形部分332、354的第二端336、358朝着彼此拉上，从而将介电流体398推入可扩展流体区域396。当处于致动状态时，第一电极306和第二电极308彼此平行。在致动状态下，介电流体398流入可扩展流体区域396以使可扩展流体区域396膨胀。照此，第一膜层322与第二膜层324在相反方向扩展。

[0087] 现在参考图15，可以提供致动系统400用于操作人造肌肉101、201、300、300'。致动系统400可以包括控制器500、操作设备460、电源480、显示设备420、网络接口硬件440和通信耦合这些部件的通信路径410。控制器500包括各种部件通信地耦合到的处理器520和非暂态电子存储器540。在一些实施例中，处理器520和非暂态电子存储器540和/或其它部件

包括在单个设备中。在其它实施例中,处理器520和非暂态电子存储器540和/或其它部件可以分布在通信耦合的多个设备之间。控制器500包括存储机器可读指令的集合的非暂态电子存储器540。处理器520执行存储在非暂态电子存储器540中的机器可读指令。非暂态电子存储器540可以包括RAM、ROM、闪存、硬盘驱动器或能够存储机器可读指令使得机器可读指令可以被处理器520访问的任何设备。因而,本文描述的致动系统400可以以任何常规的计算机编程语言、作为预编程的硬件元件或作为硬件和软件组件的组合来实现。非暂态电子存储器540可以被实现为一个存储器模块或多个存储器模块。在一些实施例中,非暂态电子存储器540包括用于执行致动系统400的功能的指令。指令可以包括用于致动人造肌肉101、201、300、300'的指令。

[0088] 处理器520可以是能够执行机器可读指令的任何设备。例如,处理器520可以是集成电路、微芯片、计算机或任何其它计算设备。非暂态电子存储器540和处理器520耦合到提供致动系统400的各种部件和/或模块之间的信号互连的通信路径410。因而,通信路径410可以将任何数量的处理器彼此通信耦合,并允许耦合到通信路径410的模块在分布式计算环境中操作。具体而言,每个模块可以作为可以发送和/或接收数据的节点来操作。如本文所使用的,术语“通信耦合”是指耦合的部件能够彼此交换数据信号,诸如例如经由导电介质的电信号、经由空气的电磁信号、经由光波导的光信号等。

[0089] 如图15中示意性描绘的,通信路径410将控制器500的处理器520和非暂态电子存储器540与致动系统400的多个其它部件通信耦合。例如,图15中描绘的致动系统400包括与操作设备460和电源480通信耦合的处理器520和非暂态电子存储器540。

[0090] 操作设备460允许用户控制人造肌肉101、201、300、300'的操作。在一些实施例中,操作设备460可以是开关、拨动开关、按钮或提供用户操作的控件的任何组合。操作设备460耦合到通信路径410,使得通信路径410将操作设备460通信耦合到致动系统400的其它模块。

[0091] 电源480(例如,电池)向人造肌肉101、201、300、300'提供电力。在一些实施例中,电源480是可再充电直流电源。应该理解的是,电源480可以是单个电源或电池,用于为人造肌肉101、201、300、300'提供电力。可以提供电源适配器(未示出)并经由线束等电耦合,用于经由电源480向人造肌肉101、201、300、300'提供电力。实际上,电源480是可以接收处于一个电平(例如,一个电压、功率电平或电流)的功率并输出处于第二电平(例如,第二电压、功率电平或电流)的功率的设备。

[0092] 在一些实施例中,致动系统400还包括显示设备420。显示设备420耦合到通信路径410,使得通信路径410将显示设备420通信耦合到致动系统400的其它模块。显示设备420可以响应于人造肌肉101、201、300、300'的致动状态或人造肌肉101、201、300、300'的致动状态的改变的指示而输出通知。而且,显示设备420可以是触摸屏,除了提供光学信息之外,还检测在显示设备420的表面上或附近的触觉输入的存在和位置。因而,显示设备420可以包括操作设备460并且在显示设备420提供的光学输出后直接接收机械输入。

[0093] 在一些实施例中,致动系统400包括网络接口硬件440,用于经由网络560将致动系统400通信耦合到便携式设备580。便携式设备580可以包括但不限于智能电话、平板电脑、个人媒体播放器或包括无线通信功能性的任何其它电子设备。应该认识到的是,当提供时,便携式设备580可以用于向控制器500提供用户命令,而不是操作设备460。照此,用户可以

能够利用操作设备460的控制来控制或设置用于控制人造肌肉101、201、300、300'的程序。因此,人造肌肉101、201、300、300'可以经由便携设备580远程控制,该便携设备580经由网络560与控制器500无线通信。

[0094] 现在应当理解的是,本文描述的实施例涉及人造肌肉和使用真空密封工艺制造人造肌肉的方法,这促进使用不能有效热密封的某些高性能电极绝缘体。特别地,本文描述的真空密封技术促进使用高介电聚合物材料(诸如PVDF)作为电极材料以增加人造肌肉的致动器性能。

[0095] 注意的是,术语“基本上”和“大约”在本文中可以用于表示可以归因于任何定量比较、值、测量或其它表示的固有不确定性程度。这些术语在本文中也用于表示定量表示可以与规定的参考不同的程度,而不会导致所讨论主题的基本功能发生变化。

[0096] 虽然本文已经说明和描述了特定实施例,但是应当理解的是,在不脱离所要求保护的主题的范围内,可以进行各种其它改变和修改。而且,虽然本文已经描述了要求保护的主题的各个方面,但是这些方面不需要结合使用。因此,所附权利要求旨在涵盖在所要求保护的主题范围内的所有这些改变和修改。

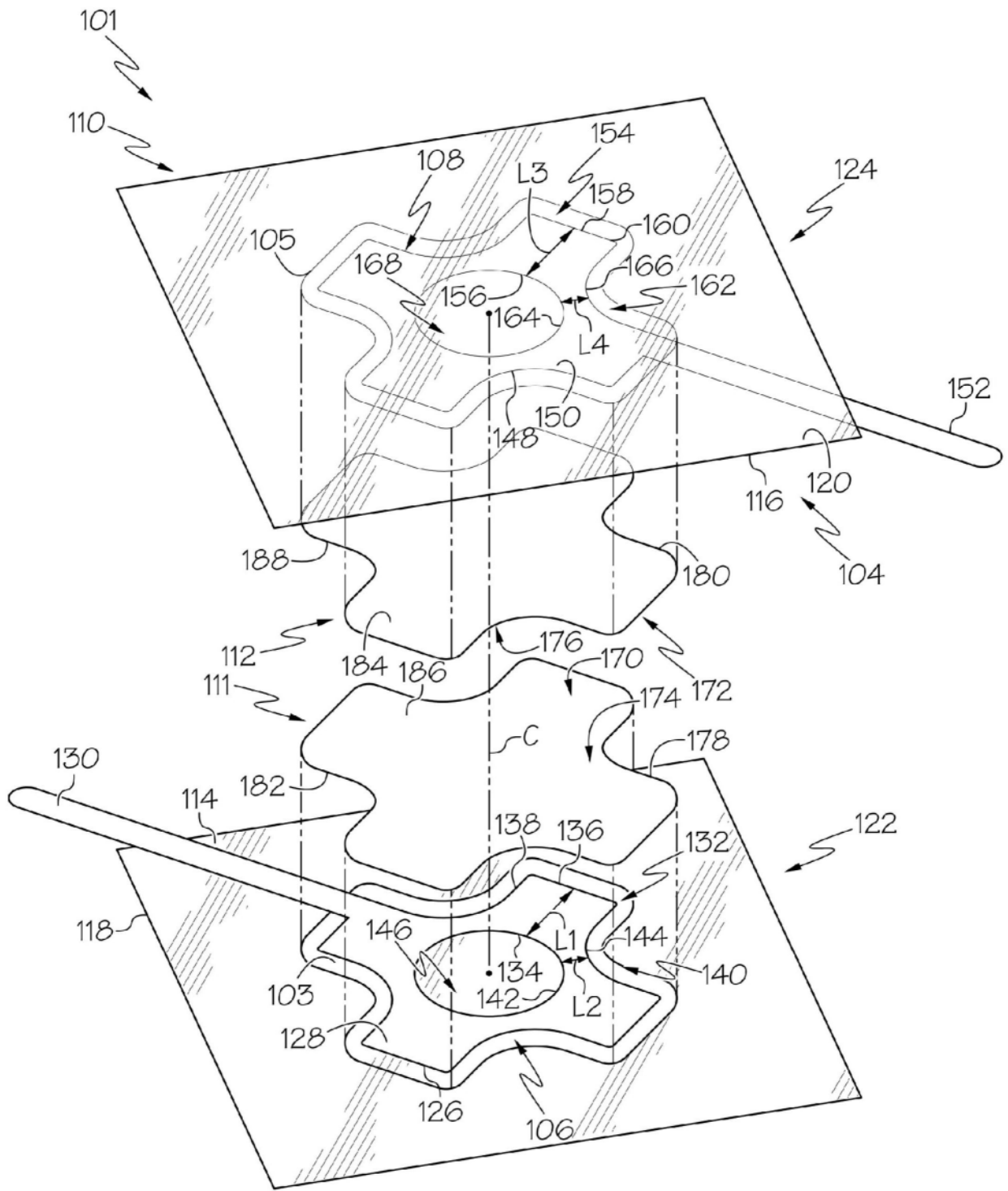


图1

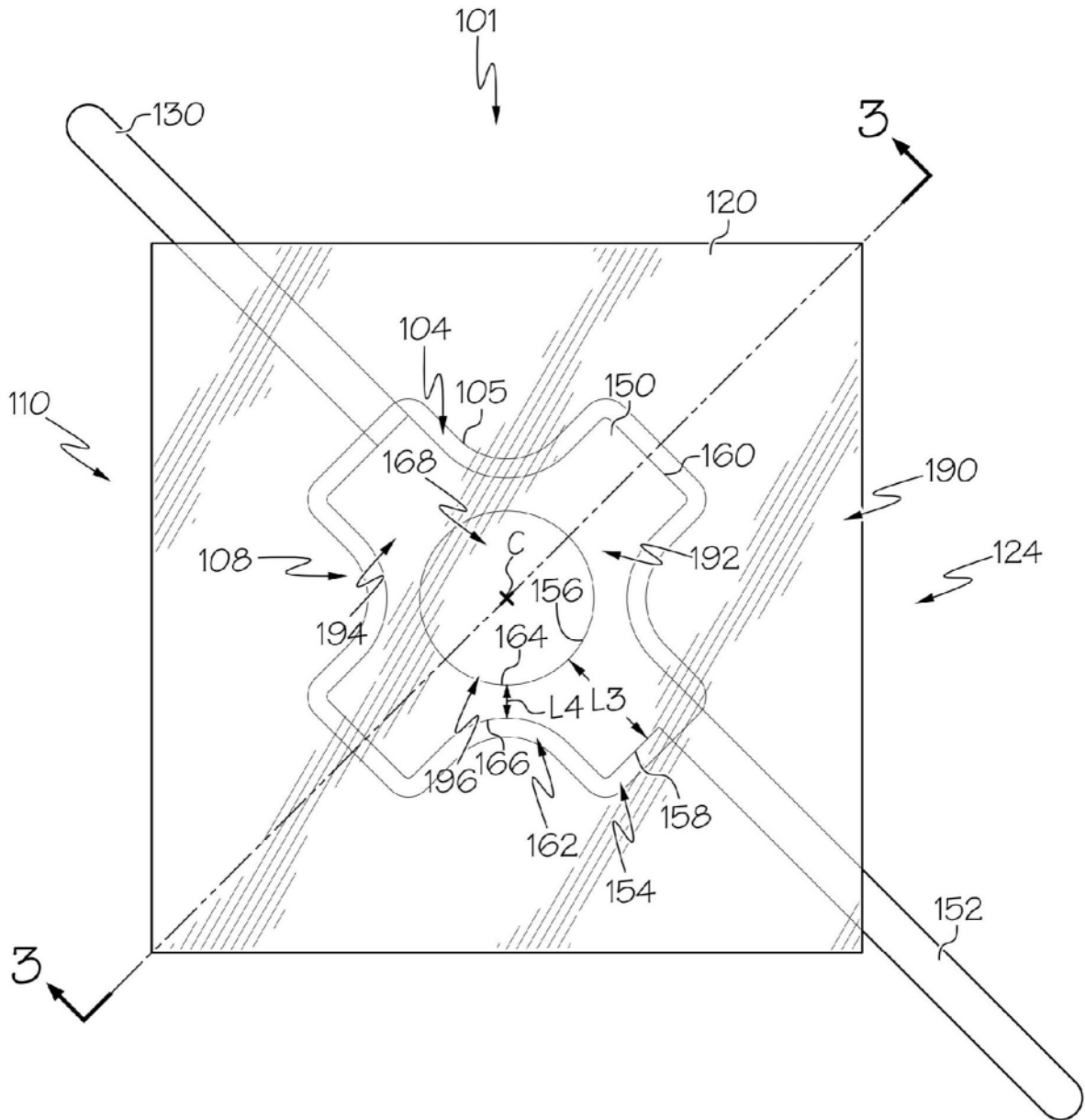


图2

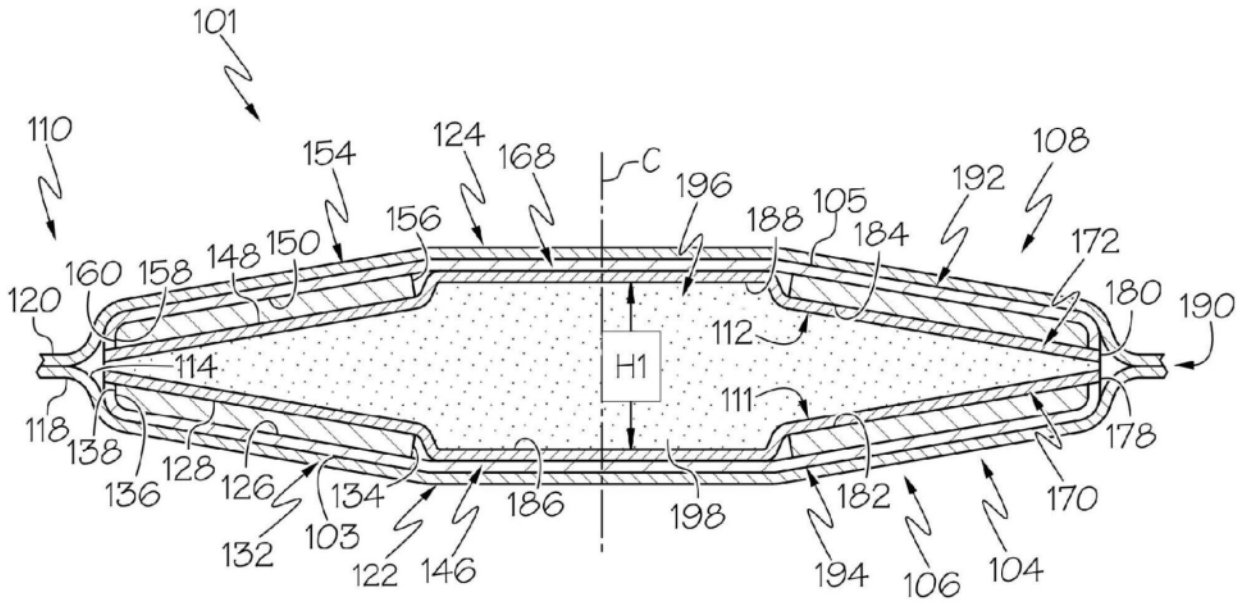


图3

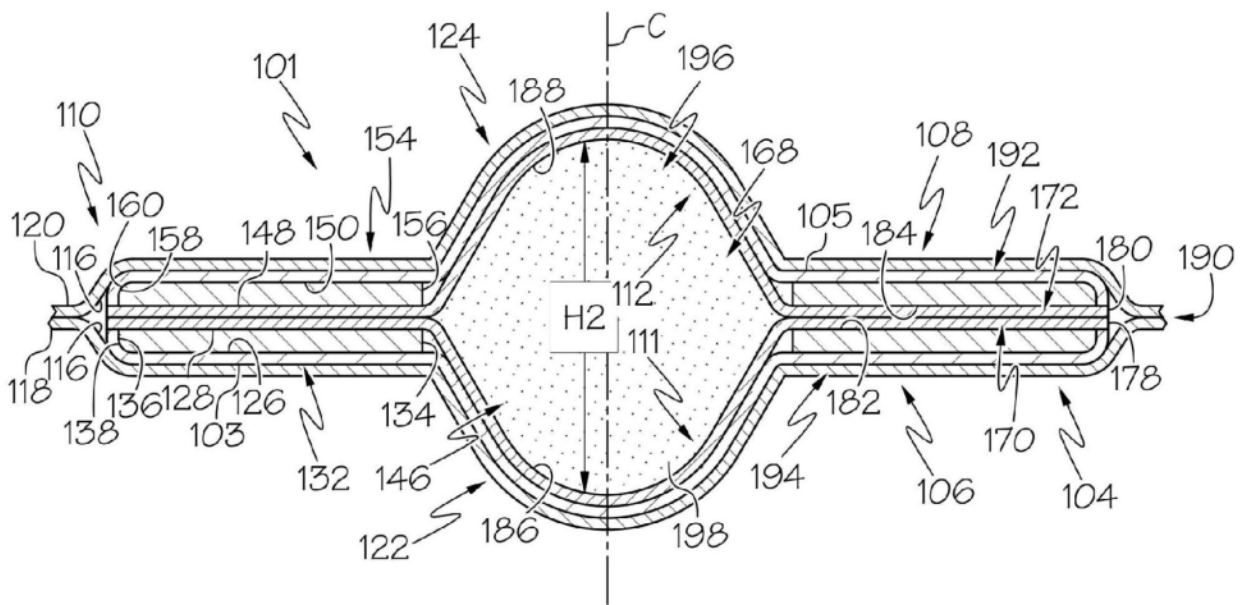


图4

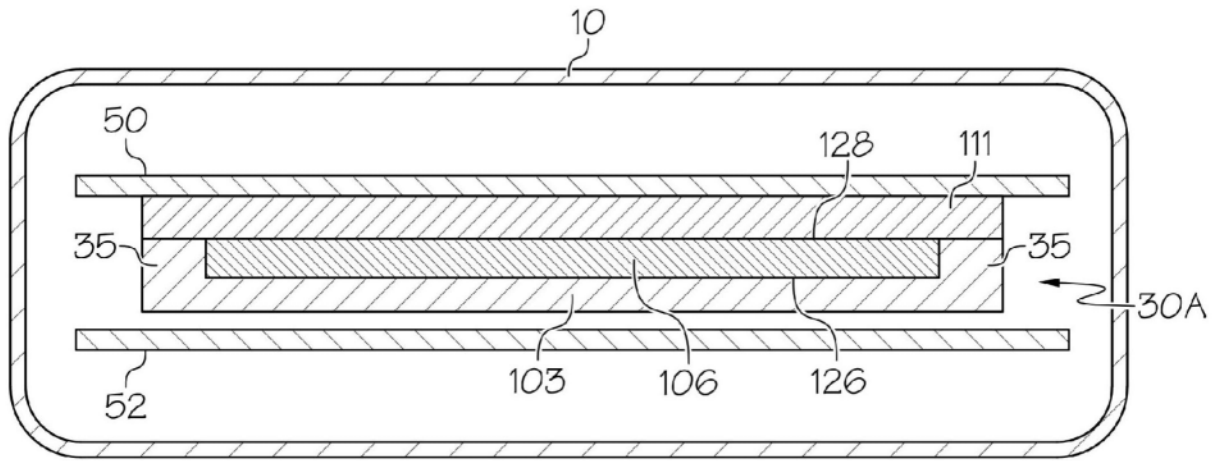


图5A

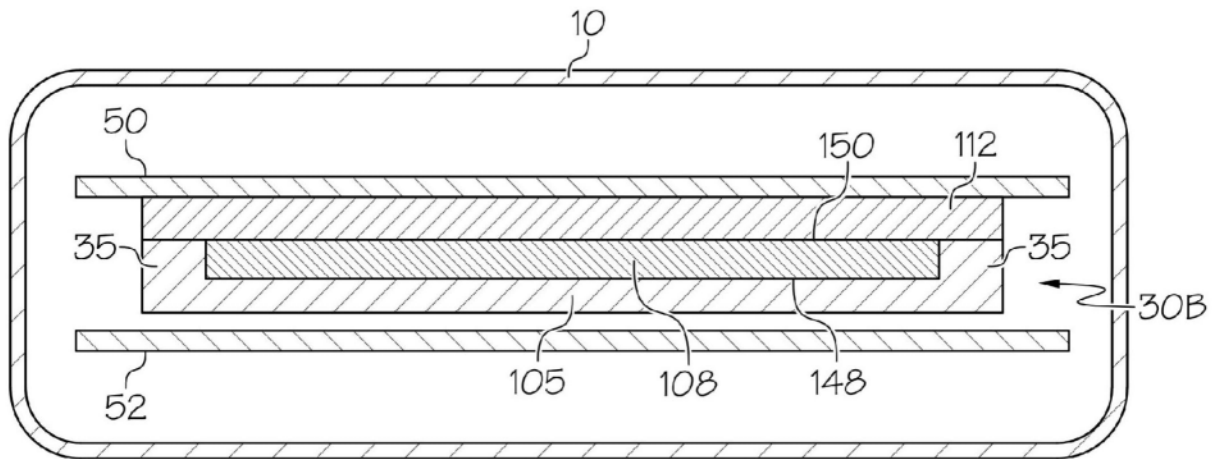


图5B

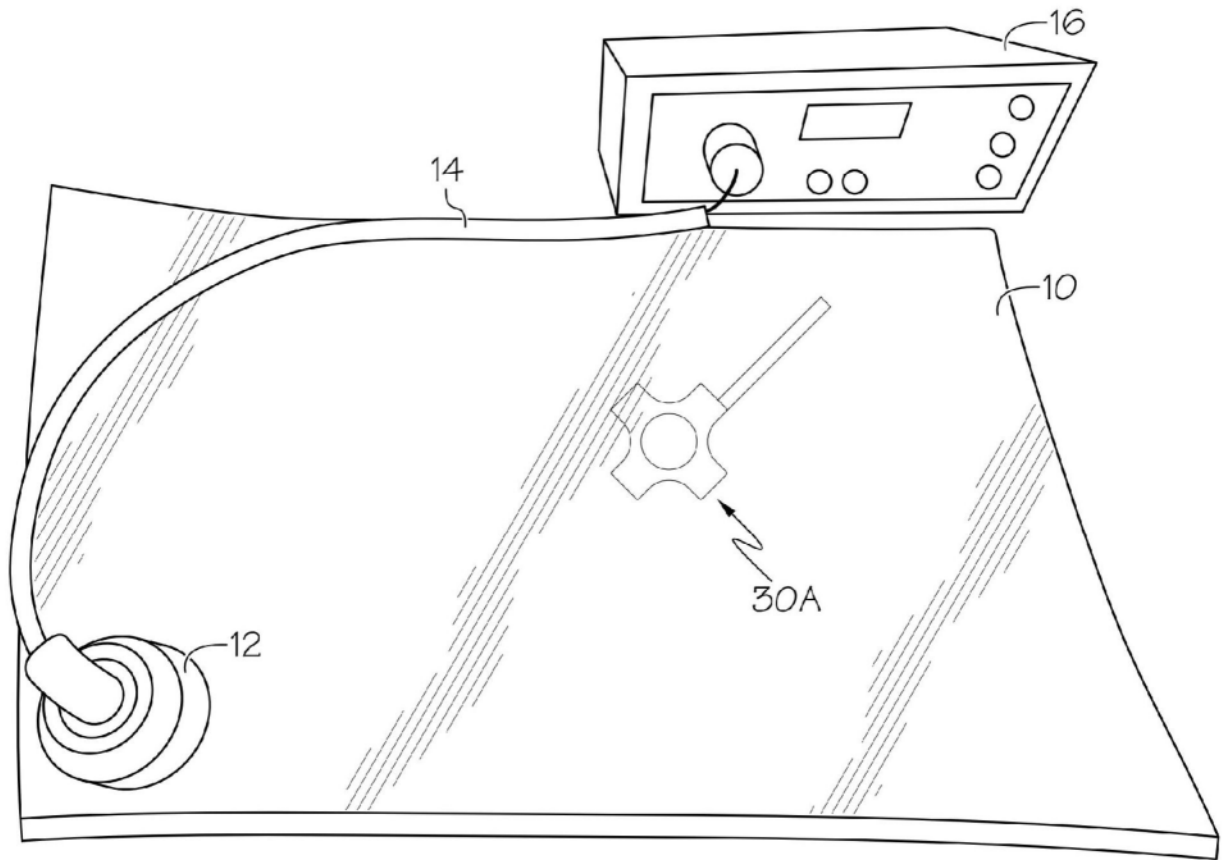


图6

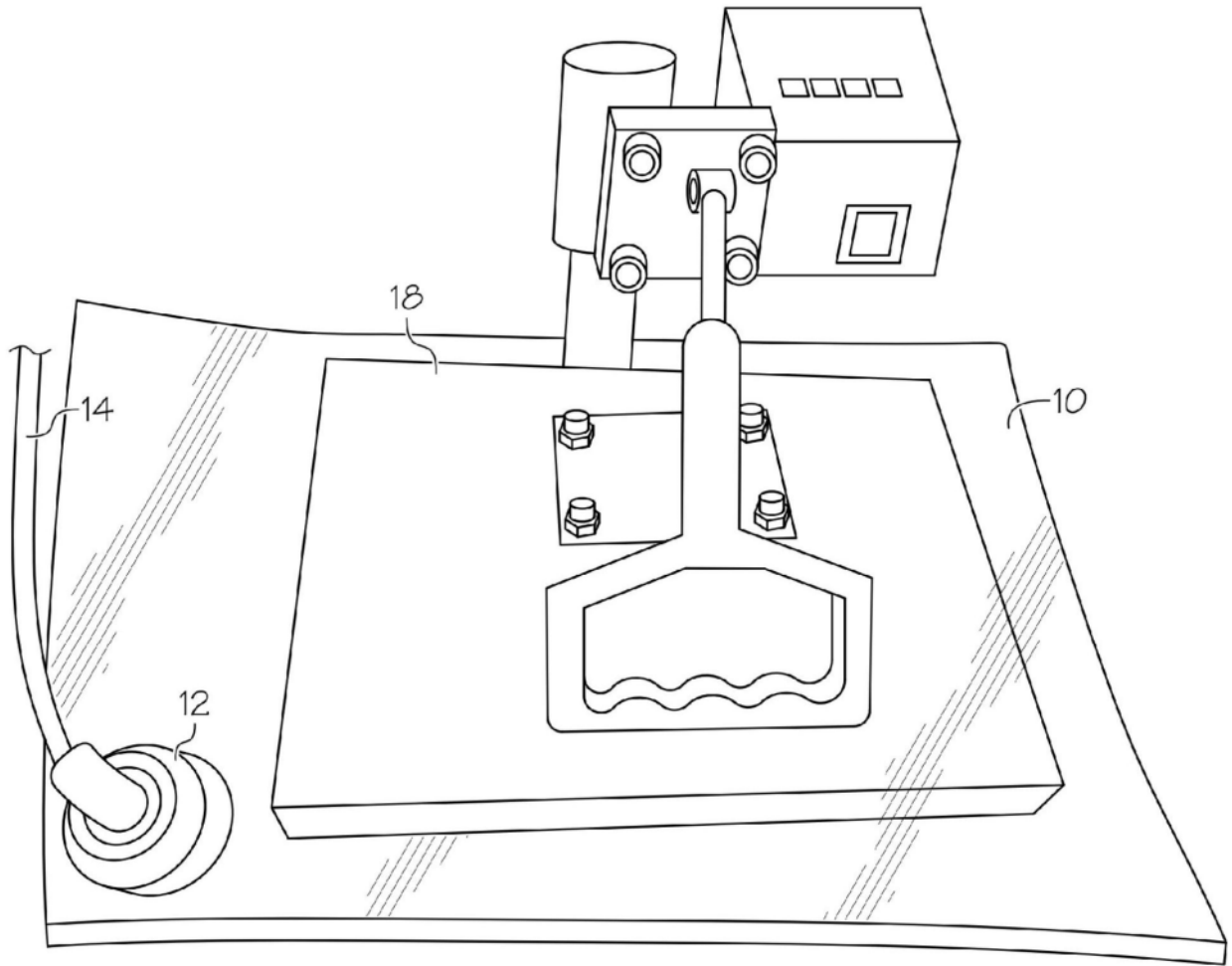


图7

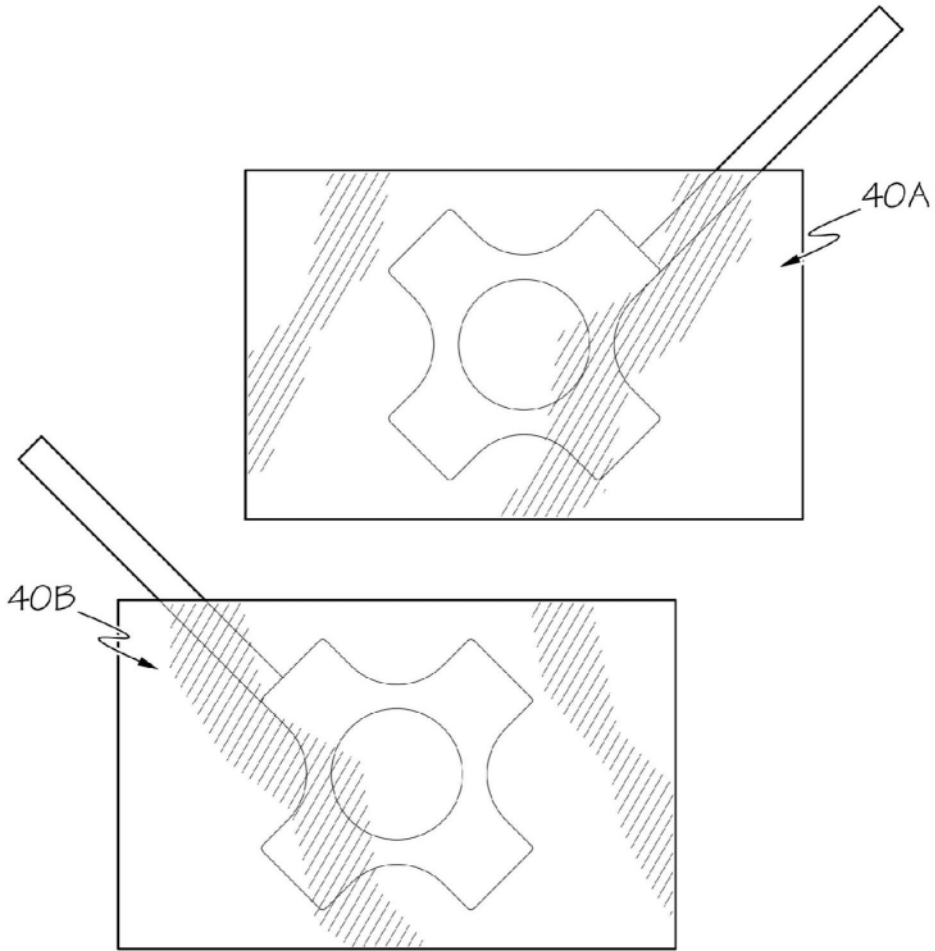


图8

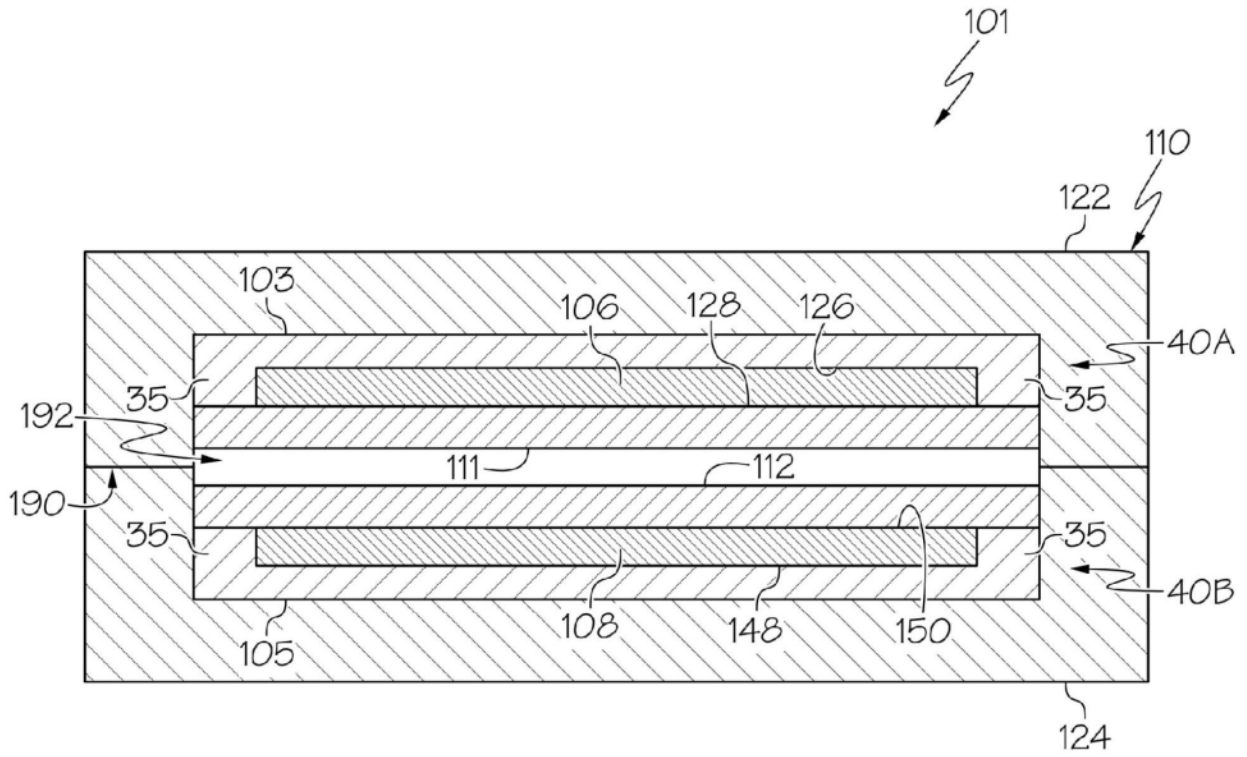


图9

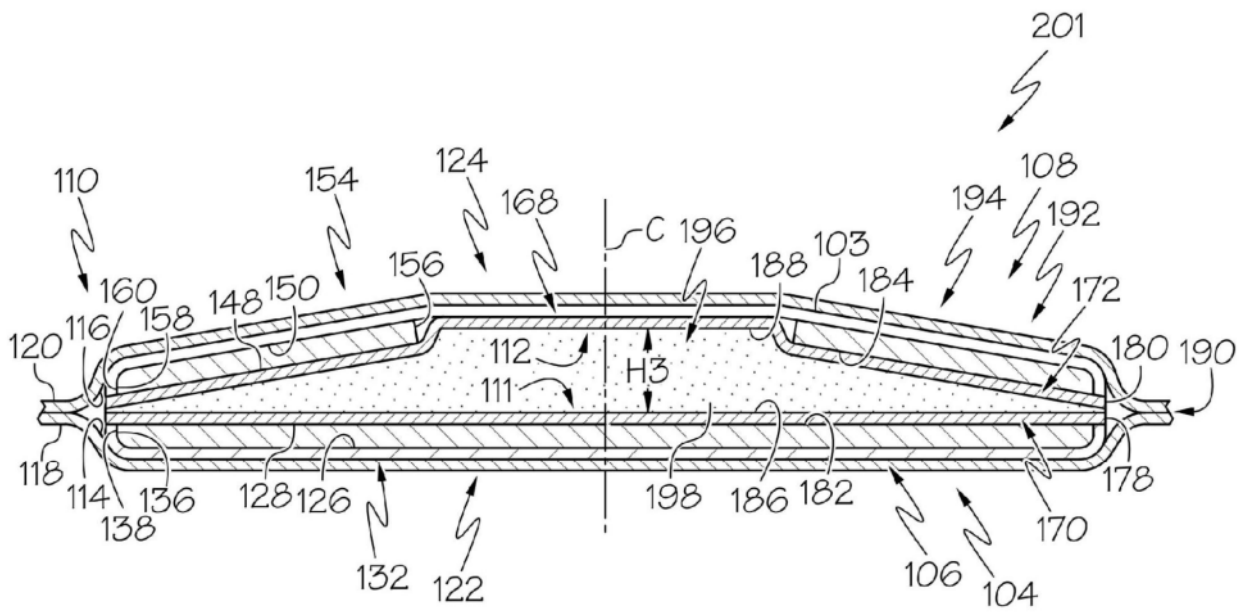


图10

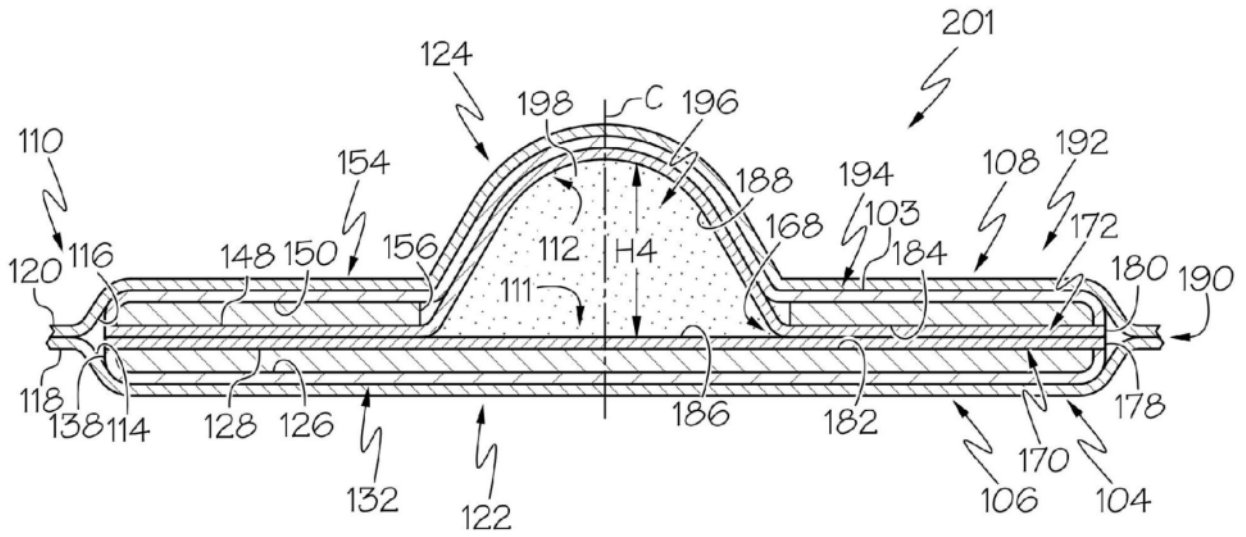


图11

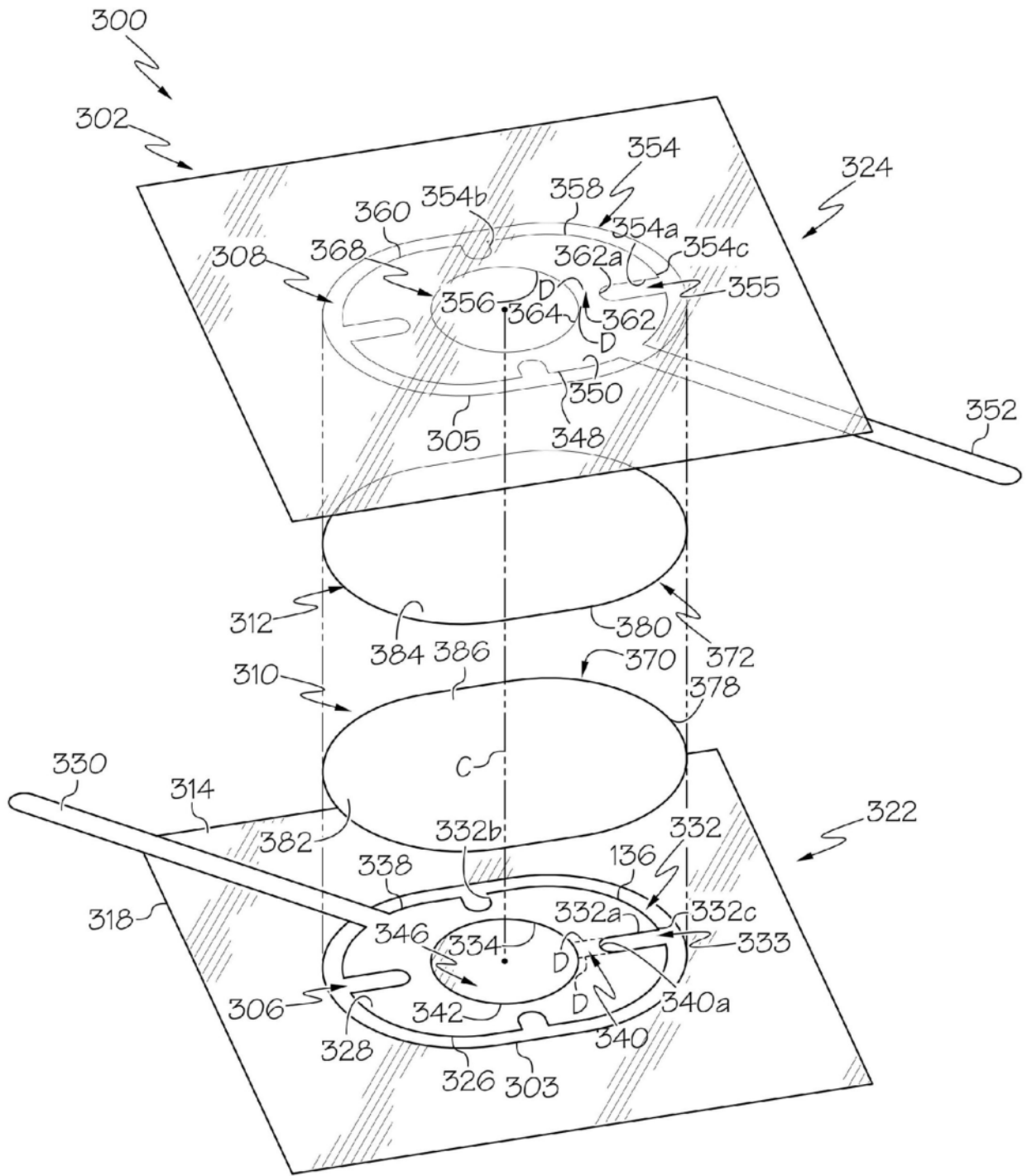


图12

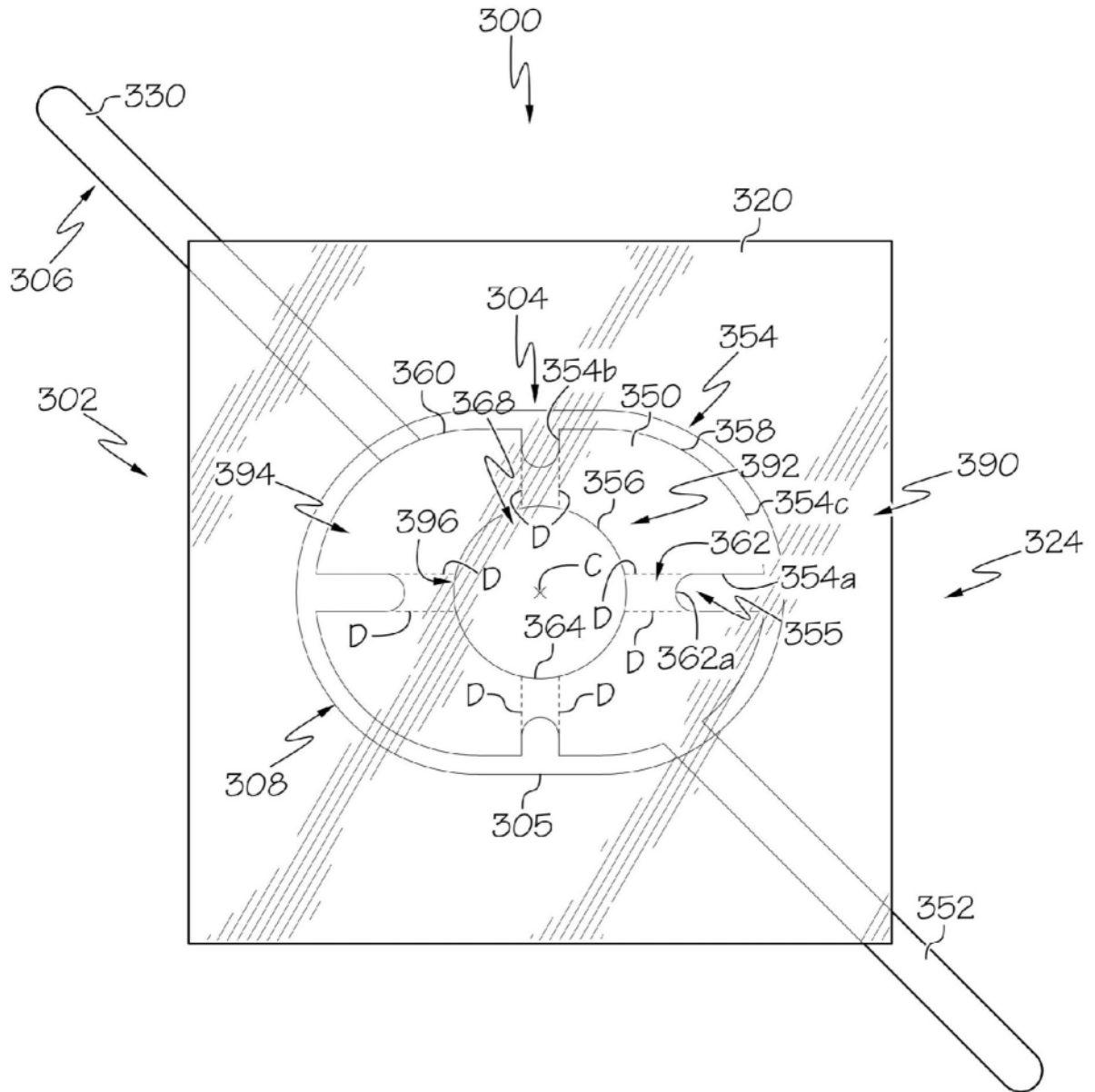


图13

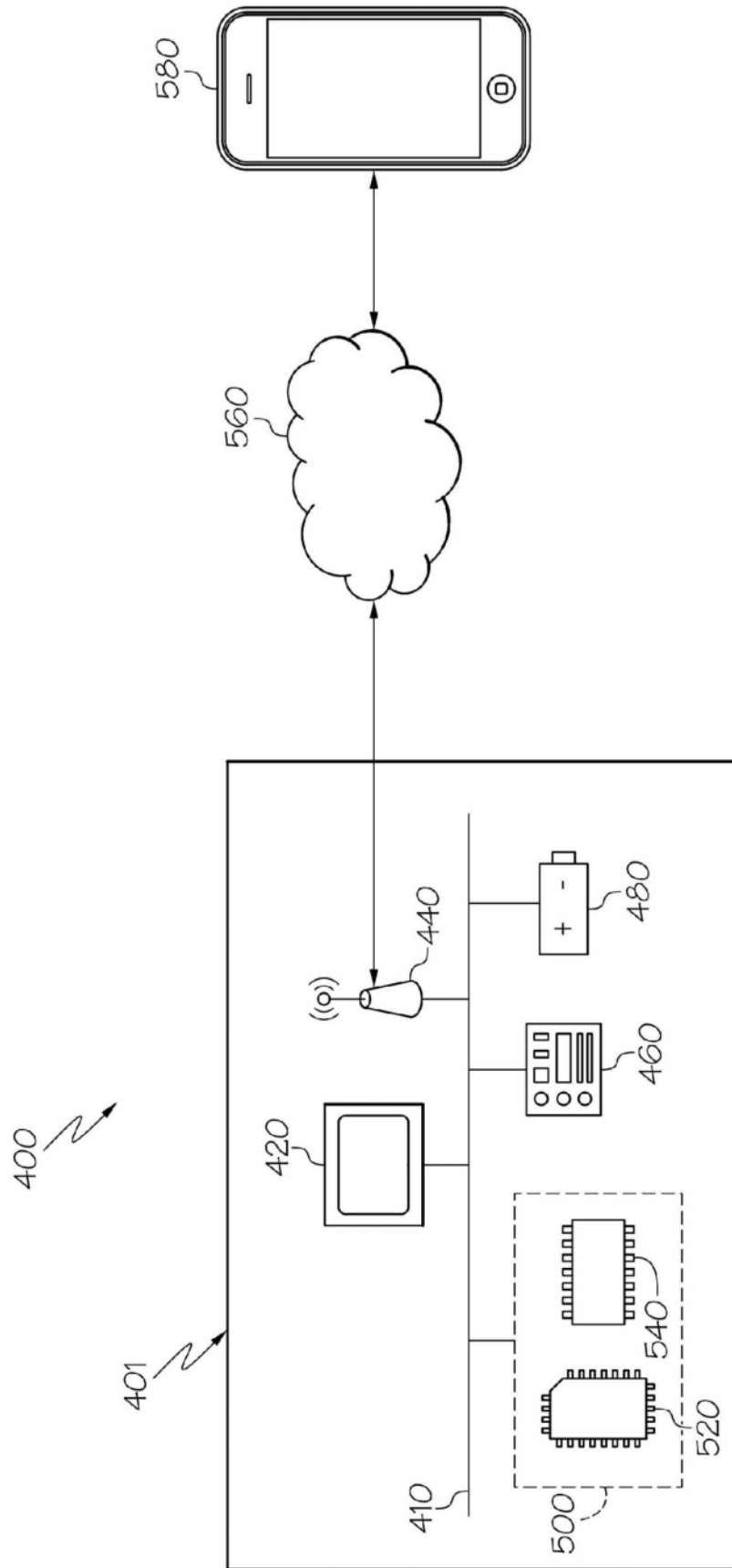


图15