



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105364640 B

(45)授权公告日 2017.09.05

(21)申请号 201510802005.0

审查员 曹赛赛

(22)申请日 2015.11.19

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 105364640 A

(43)申请公布日 2016.03.02

(73)专利权人 浙江工业大学

地址 310014 浙江省杭州市下城区朝晖六
区潮王路18号浙江工业大学

(72)发明人 赵军 袁巨龙 杭伟

(74)专利代理机构 杭州斯可睿专利事务有限
公司 33241

代理人 王利强

(51)Int.Cl.

B24B 1/04(2006.01)

B24B 1/00(2006.01)

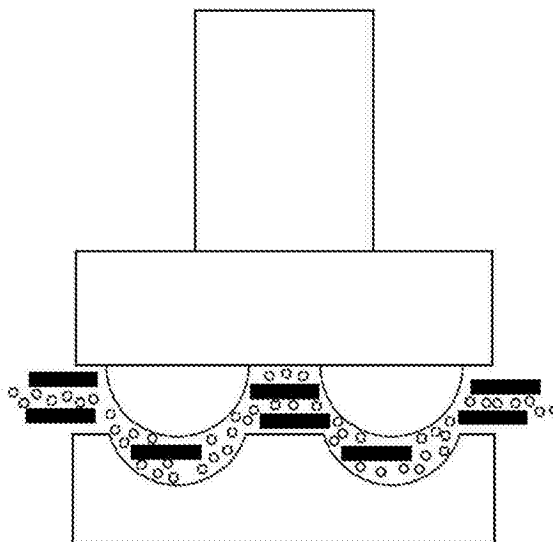
权利要求书1页 说明书5页 附图3页

(54)发明名称

一种微半环凹模阵列化学-机械分级复合制造方法

(57)摘要

一种微半环凹模阵列化学-机械分级复合制造方法,包括如下步骤:1)制作精密球阵列研抛模;2)第一级研抛:采用精密球阵列研抛模,通过化学-机械加工方法实现微凹模阵列的形状构型;3)第二级研抛:采用所述精密球阵列研抛模进行第二次研抛,通过调整超声振动的参数和Z向进给参数,使得工件的材料去除形式转变为材料塑性去除,降低研抛液中HNA溶液的浓度,减缓HNA溶液对功能材料的化学腐蚀速度;第二次研抛材料去除形式是微细超声振动下的材料塑性去除和HNA溶液对衬底材料的缓慢化学腐蚀作用,可以对微凹模进行修形和表面质量提升。本发明的加工效果:高形状精度、低表面粗糙度、高表面质量、高效率。



1. 一种微半环凹模阵列化学-机械分级复合制造方法,其特征在于:所述制造方法包括如下步骤:

1) 制作精密球阵列研抛模

所述研抛模包括工具连杆、定位基板和精密球体,工具连杆的上端与微细超声发生器相连接,所述工具连杆的下端与定位基板连接,在定位基板上加工出阵列孔径,孔径大小小于精密球体直径,在孔径和精密球体之间充满粘结剂,球体的一部分嵌入孔内;

2) 第一级研抛

采用精密球阵列研抛模,通过化学-机械加工方法实现微凹模阵列的形状构型;

在待加工的工件上涂覆Au/Cr膜,膜厚度在30nm—300nm之间,用来作为工件材料表面保护层;在研抛液中加入HNA溶液;

通过精密球阵列研抛模的微细超声振动,激发研抛模和微凹模衬底工件之间的研抛液中的微细磨粒高速冲击微凹模衬底工件,并伴随超声空化、研抛模对工件的刮擦、锤击复合作用,发生机械性材料去除,在可控化学腐蚀和微细超声仿形研抛共同作用下,对衬底工件进行材料去除,此级材料去除属于脆性去除和可控化学腐蚀材料去除;

3) 第二级研抛

采用所述精密球阵列研抛模进行第二次研抛,通过调整超声振动的参数和Z向进给参数,使得工件的材料去除形式转变为材料塑性去除,降低研抛液中HNA溶液的浓度,减缓HNA溶液对功能材料的化学腐蚀速度;第二次研抛材料去除形式是微细超声振动下的材料塑性去除和HNA溶液对衬底材料的缓慢化学腐蚀作用,可以对微凹模进行修形和表面质量提升。

2. 如权利要求1所述的一种微半环凹模阵列化学-机械分级复合制造方法,其特征在于:所述步骤1)中,在定位基板上粘结了限位挡圈,当限位挡圈碰触工件平面,Z轴向下进给运动停止。

3. 如权利要求1所述的一种微半环凹模阵列化学-机械分级复合制造方法,其特征在于:所述步骤1)中,所述精密球阵列研抛模的装配方法如下:将阵列孔内均匀涂抹防水性粘结剂,将研抛模倒置,采用精密压板垂直下压精密球体,由于精密球体和孔径之间充满防水性粘结剂,垂直压力调节防水性粘结剂膜的厚度,进而达到球体上端最高点位于同一平面。

4. 如权利要求2所述的一种微半环凹模阵列化学-机械分级复合制造方法,其特征在于:所述步骤1)中,所述精密球阵列研抛模的装配方法如下:将阵列孔内均匀涂抹防水性粘结剂,将研抛模倒置,采用精密压板垂直下压精密球体,由于精密球体和孔径之间充满防水性粘结剂,垂直压力调节防水性粘结剂膜的厚度,进而达到球体上端最高点位于同一平面;

对于限位挡圈装配方式,采用带有阵列孔的精密压板垂直下压限位挡圈,使得限位挡圈上圆环截面在一个平面内,完成限位挡圈的装配。

5. 如权利要求4所述的一种微半环凹模阵列化学-机械分级复合制造方法,其特征在于:根据材料去除情况以及后续抛光的预留量调整限位挡圈的高度。

6. 如权利要求1~5之一所述的一种微半环凹模阵列化学-机械分级复合制造方法,其特征在于:所述精密球体采用传统的塑性球体,材料为合金钢和特种钢。

7. 如权利要求1~5之一所述的一种微半环凹模阵列化学-机械分级复合制造方法,其特征在于:所述精密球体采用陶瓷球体。

一种微半环凹模阵列化学-机械分级复合制造方法

技术领域

[0001] 本发明属于超精密加工领域,尤其是一种微半环凹模阵列化学-机械分级复合制造方法。

背景技术

[0002] 半球谐振陀螺是一种新型惯性传感器,与机械陀螺相比具有诸多优点。宏观尺度的半球谐振陀螺精度已达到惯性级别,开始应用于航空、兵器和空间惯导系统,但由于尺度大导致体积大、质量重、功耗高,且高度依赖于超精密加工技术,在很大程度上限制了其应用。MEMS陀螺具有尺寸小、重量轻、功耗低等优点,但现有的MEMS陀螺无法达到惯性级精度,不能应用在精度要求高的场合,例如在GPS盲区为飞行器提供短程导航。MEMS陀螺精度不高的主要原因在于:现有的MEMS元件加工方法,如化学腐蚀、刻蚀、光刻转印等,绝大部分是2D或2.5D的结构,这些方法加工的元器件质量和材料分布不均,导致陀螺感应频率与驱动之间匹配性差,使得MEMS陀螺的精度受到极大限制。为了提升MEMS陀螺的精度,国内外学者开始致力于研究3D结构MEMS半球谐振陀螺,这种陀螺最关键的部件是沉积在晶体材料微半环凹模上的高精度微小半球薄膜壳,研究证明基于化学气相沉积(chemical vapor deposition,CVD)的多晶金刚石薄膜谐振器品质因数远远高于同样结构的硅材料谐振器。然而,CVD微半球壳的精度依赖其“母体”微半环凹模的形状精度、表面粗糙度和表面质量。目前,单晶硅材料微半环凹模的加工方法有:从传统MEMS的2D和2.5D结构制造方法扩展而来的三维结构加工方法、微细EDM加工、微铣削加工、微细超声分层加工。至今,这些已见报道的加工方法还无法满足单晶硅硬脆微半环凹模加工精度和加工效率的要求,主要因为:(1)传统的MEMS微加工一湿法化学刻蚀和干法等离子刻蚀等方法,在从2D结构向3D结构延伸的过程中,都难以摆脱晶体方向和掩膜材料的选择性问题,无法加工出具有高度对称性和材料一致均匀的微半环凹模,此种方法加工微半环凹模精度差,且效率低。(2)微细电火花加工(μ EDM)微半环凹模,由于放电空间小,要求加工设备的精度极高,难以制造出形状精度极高的电极,且工具电极在加工过程中磨损很快,加工出来的微半环凹模表面质量差,形状精度不高。(3)微铣削加工微半环凹模,在材料脆性去除时,由于铣削加工自身的弱点,导致微半环凹模顶部或者底部经常会出现崩裂、表面及亚表面损伤,难以满足加工要求,在采用塑性延展铣削加工时,加工效率和成品率极低。(4)利用超声和微细工具分层加工微半环凹模,由于微细工具的磨损难以准确预测和控制,因而分层进给路径难以合理规划,导致微半环凹模形状精度较差,且加工效率低。(5)其他的电加工微结构的方法,如电解加工,受到单晶硅材料导电性的限制,难以用于微半环凹模的加工。综上,由于无法加工出高质量的谐振陀螺单晶硅微半环凹模,至今尚未见报道研制出惯性级别精度的MEMS半球谐振陀螺。

发明内容

[0003] 为了克服已有谐振陀螺单晶硅微半环凹模无法实现高形状精度、低表面粗糙度、高表面质量、高效率加工的不足,本发明提供了一种高形状精度、低表面粗糙度、高表面质

量、高效率的微半环凹模阵列化学-机械分级复合制造方法。

[0004] 本发明解决其技术问题所采用的技术方案是：

[0005] 一种微半环凹模阵列化学-机械分级复合制造方法，所述制造方法包括如下步骤：

[0006] 1) 制作精密球阵列研抛模

[0007] 所述研抛模包括工具连杆、定位基板和精密球体，工具连杆的上端与微细超声发生器相连接，所述工具连杆的下端与定位基板连接，在定位基板上加工出阵列孔径，孔径大小小于精密球体直径，在孔径和精密球体之间充满粘结剂，球体的一部分嵌入孔内；

[0008] 2) 第一级研抛

[0009] 采用精密球阵列研抛模，通过化学-机械加工方法实现微凹模阵列的形状构型；

[0010] 在待加工的工件上涂覆Au/Cr膜，膜厚度在30nm---300nm之间，用来作为晶体材料表面保护层；在研抛液中加入HNA溶液；

[0011] 通过精密球阵列研抛模的微细超声振动，激发研抛模和微凹模衬底工件之间的研抛液中的微细磨粒高速冲击微凹模衬底工件，并伴随超声空化、研抛模对工件的刮擦、锤击复合作用，发生机械性材料去除，在可控化学腐蚀和微细超声仿形研抛共同作用下，对衬底工件进行材料去除，此级材料去除属于脆性去除和化学腐蚀材料去除；

[0012] 3) 第二级研抛

[0013] 采用所述精密球阵列研抛模进行第二次研抛，通过调整超声振动的参数和Z向进给参数，使得工件的材料去除形式转变为材料塑性去除，降低研抛液中HNA溶液的浓度，减缓HNA溶液对功能材料的化学腐蚀速度；第二次研抛材料去除形式是微细超声振动下的材料塑性去除和HNA溶液对衬底材料的缓慢化学腐蚀作用，可以对微凹模进行修形和表面质量提升。

[0014] 进一步，所述步骤1)中，在定位基板上粘结了限位挡圈，当限位挡圈碰触工件平面，Z轴向下进给运动停止。

[0015] 再进一步，所述步骤1)中，所述精密球阵列研抛模的装配方法如下：将阵列孔内均匀涂抹防水性粘结剂，将研抛模倒置，采用精密压板垂直下压精密球体，由于精密球体和孔径之间充满防水性粘结剂，垂直压力调节防水性粘结剂膜的厚度，进而达到球体上端最高点位于同一平面。

[0016] 所述步骤1)中，所述精密球阵列研抛模的装配方法如下：将阵列孔内均匀涂抹防水性粘结剂，将研抛模倒置，采用精密压板垂直下压精密球体，由于精密球体和孔径之间充满防水性粘结剂，垂直压力调节防水性粘结剂膜的厚度，进而达到球体上端最高点位于同一平面；

[0017] 对于限位挡圈装配方式，采用带有阵列孔的精密压板垂直下压限位挡圈，使得限位挡圈上圆环截面在一个平面内，完成限位挡圈的装配。

[0018] 根据材料去除情况以及后续抛光的预留量调整限位挡圈的高度。

[0019] 所述精密球体采用传统的塑性球体，材料为合金钢和特种钢。

[0020] 或者是：所述精密球体采用陶瓷球体。

[0021] 本发明的技术构思为：在功能材料（单晶硅、蓝宝石、红宝石等）表面镀Au/Cr膜，膜厚度在30nm---300nm之间，用来作为晶体材料表面保护层（HNA溶液），防止HNA溶液腐蚀晶体衬底材料表面，HNA溶液指的是HNO₃、HF、CH₃COOH的混合液。在研抛液中，加入HNA溶液，HNA

溶液对没有涂覆保护层的部分或者保护层被机械作用打开的部分发生腐蚀作用,腐蚀速度可以通过改变研抛液中的HNA溶液浓度进行调控。另外,通过阵列研抛模的微细超声振动,激发研抛模和微凹模衬底工件(单晶硅、蓝宝石、红宝石等功能晶体)之间的研抛液中的微细磨粒高速冲击微凹模衬底工件,并伴随超声空化、研抛模对工件的刮擦、锤击等复合作用,发生机械性材料去除。这样在可控化学腐蚀和微细超声仿形研抛共同作用下,对衬底工件进行材料去除,材料的机械去除原理如图1所示,化学-机械共同作用效果如图2所示。

[0022] 采用两级分级研抛,第一级研抛采用自制的精密球阵列研抛模,通过所述的化学-机械加工方法实现微凹模阵列的形状构型,通过第一次研抛,微凹模阵列的位置和形状精度基本可以满足要求,第一次研抛主要实现材料的脆性去除和较快速的化学腐蚀。采用同样的自制精密球阵列研抛模进行第二次研抛,第二次研抛需要对微凹模阵列形状精度进行修正和凹模表面粗糙度的降低,第二次研抛不同于第一次研抛主要表现在:通过调整超声振动的参数和Z向进给参数,使得工件的材料去除形式转变为材料塑性去除,降低研抛液中HNA溶液的浓度,减缓HNA溶液对功能材料的化学腐蚀速度。第二次研抛材料去除形式是微细超声振动下的材料塑性去除和HNA溶液对衬底材料的缓慢化学腐蚀作用,因而可以对微凹模进行修形和表面质量提升。

[0023] 上述阵列式分级研抛过程可在同一设备上实现,不同点只是需要更换研抛模和研抛液,可大幅提升微半环凹模的加工效率,保证微凹模圆周半径的一致性和不同凹模之间几何形状的一致性,通过第二级材料塑性去除和HNA溶液对工件衬底材料化学去除作用的协同机械-化学复合研抛方式,可以提高微凹模阵列的形状精度和表面质量。

[0024] 本发明的有益效果主要表现在:高形状精度、低表面粗糙度、高表面质量、高效率。

附图说明

[0025] 图1是微凹模阵列式研抛原理图。

[0026] 图2是带有保护层的工件化学-机械复合加工后图。

[0027] 图3是研抛模结构图。

[0028] 图4是研抛模装配方法示意图。

[0029] 图5是微半环凹模阵列微细超声分级研抛装置的结构图。

[0030] 图6是微半环凹模阵列微细超声分级研抛装置的轴等侧图。

具体实施方式

[0031] 下面结合附图对本发明作进一步描述。

[0032] 参照图1~图6,一种微半环凹模阵列化学-机械分级复合制造方法,所述制造方法包括如下步骤:

[0033] 1) 制作精密球阵列研抛模

[0034] 所述研抛模包括工具连杆71、定位基板72、精密球体75,工具连杆71的上端与微细超声发生器相连接,所述工具连杆71的下端与定位基板72连接,在定位基板72上加工出阵列孔径,孔径大小小于精密球体直径,在孔径和精密球体75之间充满粘结剂,球体的一部分嵌入孔内;

[0035] 2) 第一级研抛

[0036] 采用精密球阵列研抛模,通过化学-机械加工方法实现微凹模阵列的形状构型;

[0037] 在待加工的工件上涂覆 Au/Cr 膜,膜厚度在30nm---300nm之间,用来作为晶体材料表面保护层;在研抛液中加入HNA溶液;

[0038] 通过精密球阵列研抛模的微细超声振动,激发研抛模和微凹模衬底工件之间的研抛液中的微细磨粒高速冲击微凹模衬底工件,并伴随超声空化、研抛模对工件的刮擦、锤击复合作用,发生机械性材料去除,在可控化学腐蚀和微细超声仿形研抛共同作用下,对衬底工件进行材料去除,此级材料去除属于脆性去除;

[0039] 3) 第二级研抛

[0040] 采用所述精密球阵列研抛模进行第二次研抛,通过调整超声振动的参数和Z向进给参数,使得工件的材料去除形式转变为材料塑性去除,降低研抛液中HNA溶液的浓度,减缓HNA溶液对功能材料的化学腐蚀速度;第二次研抛材料去除形式是微细超声振动下的材料塑性去除和HNA溶液对衬底材料的缓慢化学腐蚀作用,可以对微凹模进行修形和表面质量提升。

[0041] 本发明中,在一定厚度的晶体材料(单晶硅、蓝宝石、红宝石等)衬底片上,通过材料去除形成微半环凹模,几何形状多为球冠,但不限于球冠,几何外形最大截面直径(或最大截面积上两点最大距离)范围为0.2mm至10mm,若微凹模为球冠形结构,要求具有极佳的形状精度(球度),凹模边缘位于衬底上表面,边缘半径变化量 ΔR 与边缘半径 R 之间的比值尽可能趋近于0,同一尺寸的不同微凹模之间形状具有一致性。

[0042] 进一步地,为实现这种微半环凹模的化学-机械复合制造,其原理为:采用二级分级阵列式研抛,第一级加工采用自制的精密球阵列研抛模,如图3所示。精密球阵列研抛模沿Z方向通过两级进给向下运动,协同微细超声振动,激发研抛液内的磨粒高速冲击衬底工件,在磨粒冲击、超声空化、研抛模锤击、研抛模刮擦等复合作用下,实现微半环凹模阵列材料的机械性去除,另外,伴随HNA溶液的化学腐蚀作用,实现微凹模阵列的化学腐蚀材料去除,此级材料去除属于脆性去除和化学腐蚀去除,主要作用是对微凹模阵列型进行构形,以满足微半环凹模阵列的形位要求。

[0043] 进一步地,采用同样的自制精密球阵列研抛模进行第二次研抛,第二次研抛需要对微凹模阵列形状精度进行修正和降低微凹模表面粗糙度,第三次研抛同样需要Z轴的两级向下进给运动,以及精密球阵列研抛模的微细超声振动,不同于第二次研抛主要表现在:通过调整超声振动的参数和Z向进给参数,使得工件的材料去除形式不再是脆性材料去除,材料去除主要依靠磨粒的冲击作用,此次研抛过程需要采用纳米级磨粒,加之对工件进行材料塑性去除,因而可以对微凹模进行修形和降低表面粗糙度。

[0044] 进一步地,自制精密球阵列研抛模结构及其装配方法如图3和图4所示。工具连杆71、定位基板72、连接胶体73、限位挡圈74、精密球体75,工具连杆71与微细超声发生器相连接。在定位基板72上加工出阵列孔径,孔径大小小于精密球体75直径,在孔径和精密球体75之间充满粘结剂,球体的一部分嵌入孔内,由于所有阵列孔径的大小相差极小且精密球体直径之间的大小亦相差很小,所以精密球嵌入孔后嵌入高度基本一致,具体等高装配方法在下面叙述。为防止Z向向下进给过度,在定位基板5上粘结了限位挡圈74,当限位挡圈74(柔性且具有一定刚度),碰触工件平面,Z轴向下进给运动停止,根据材料去除情况以及后续抛光的预留量,限位挡圈的高度可以调整。所述定位基板72的底面覆盖连接胶体73。

[0045] 研抛模的装配方法为:将阵列孔内均匀涂抹防水性粘结剂,如图4所示将研抛模倒置,采用平面度极佳的精密压板76垂直下压精密球体,由于精密球体75和孔径之间充满防水性粘结剂,垂直压力可以调节防水性粘结剂膜的厚度,进而达到球体上端最高点位于同一平面的目的。对于限位挡圈74采用类似的装配方式,采用带有阵列孔(阵列孔径大小大于球直径)的精密压板,垂直下压限位挡圈74,使得限位挡圈上圆环截面在一个平面内,完成限位挡圈的装配。

[0046] 进一步地,为解决加工过程中精密球阵列研抛模的高精度球体的磨损问题,除所叙的使用阵列微细工具去除大部分材料之外,所采用的其他技术方案还包括:第一种方案,采用传统的塑性球体,材料为合金钢和特种钢,实验研究表明,采用合金钢作为高精精密球体,在单晶硅硅片上进行凹模阵列加工时,适当调整进给速度和超声频率等加工参数,可以保证球体的磨损量小于5%,第二种方案,本发明提出采用硬度更高的陶瓷球体作为精密研抛球,其硬度顺序为:MOHS_{精密球}>MOHS_{磨粒}>MOHS_{工件},从莫氏硬度的排序上很容易理解在对工件进行有效加工的同时,精密球的磨损量将减小。

[0047] 进一步地,整个微小凹模阵列式研抛装置构成如图5和图6所示。主要零部件为:1.床身、2.Z方向主进给机构、3.Z方向微动进给机构4.微细超声振动装置、5.可调微细超声波发生器、6.工具连接装置、7.超精密研抛模、8.研抛液进给和循环系统、9.实时图像显微系统、10.工件、11.传感器连接板、12.力传感器、13.XY工作台、14.工作平台(优选为大理石平台)、15.计算机控制系统、16.配电系统。具体连接方式和加工方法为:床身1固定于大理石平台上,大理石平台具有极佳的防振性能,可以隔离和减少外部环境的振动,Z方向进给机构为两级进给,主进给机构2安装在床身上,微动进给机构3安装于主进给机构之上,实际加工时实现两级进给,主进给机构的精度在微米级,微动进给机构的精度可达纳米级,微细超声振动装置4与微动进给机构3相联,调节可调微细超声波发生器5的参数可以调整微小超声振动装置4的振动频率和幅度,通过工具连接装置6,实现超精密研抛模7与微细超声振动装置4的连接,研抛液进给系统和循环系统8,使得研抛液均匀分布和循环在研抛模7和工件10之间。加工时,Z方向两级进给的同时,实现研抛模的微细超声振动,这种振动使得磨粒以很高的速度冲击工件表面,加之超声空化、研抛模锤击、刮擦等因素的综合作用下实现材料快速去除,实现微半环凹模阵列式研抛加工。在加工的同时,可以采用示踪粒子对流场和磨粒场的分布以及运动状态进行分析和跟踪,当使用PIV观察磨粒场时,需要制造和待加工工件同样几何形状的亚克力透明板,可分别从上方和从工件下方分别观察示踪粒子的分布和运动状态,也可采用闪频摄像装置对流场和磨粒场进行观察分析。根据加工要求,利用实时显微系统9观测微半环凹模的大致形状和超精密球体的磨损状态。传感器连接板11用于连接工件10和力传感器12,传感器12用来检测加工力的大小以及限位装置与工件是否接触,XY工作台13用来实现工件的平面移动,以满足加工不同形状、不同阵列排布、不同数量阵列的要求,传感器12固定于XY工作平台上方,计算机控制系统用以控制加工装置的进给速度、研抛力大小、研抛液进给速度以及其他加工参数,配电系统用于对整个机床系统和微细超声波发生器进行供电。

[0048] 本实施例中,在微细工具阵列研抛模、自制超精密球阵列研抛模、两级Z方向进给、分级微细超声振动、可控HNA化学去除的的协同下,综合流场和磨粒场分析,实现微小半环凹模阵列式高效超精密研抛。

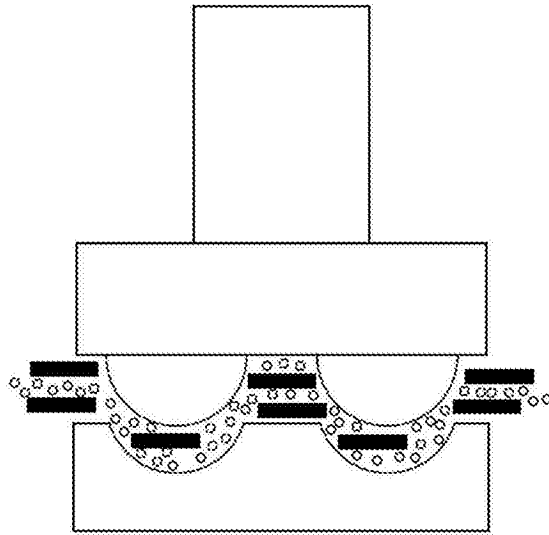


图1

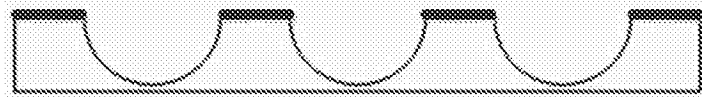


图2

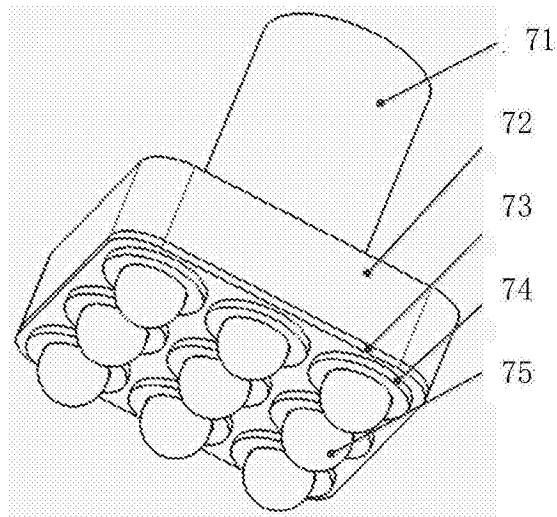
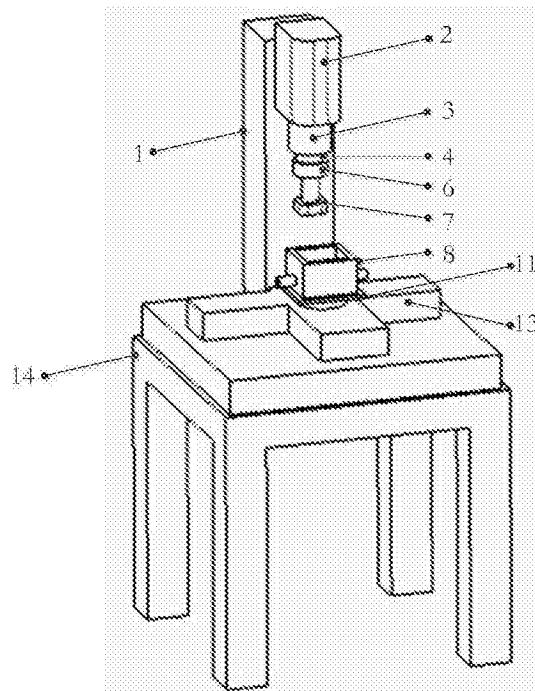
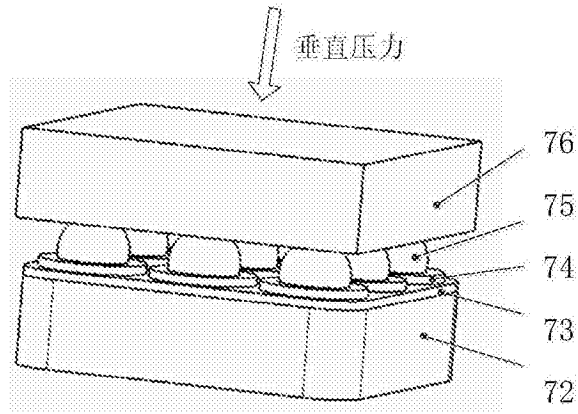


图3



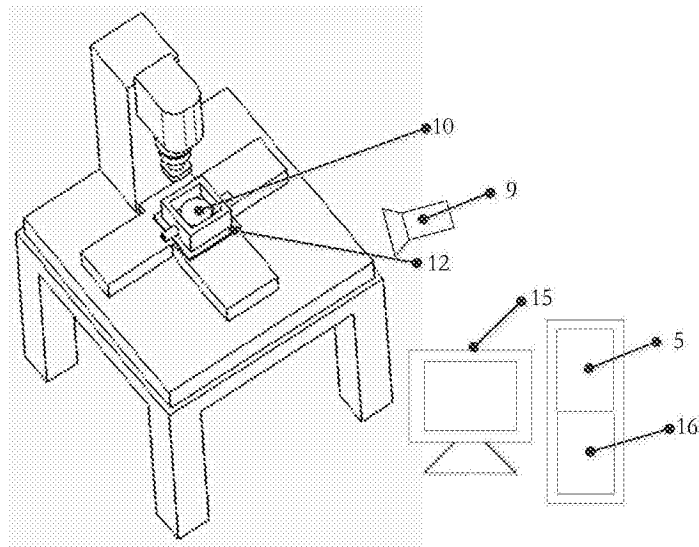


图6