



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103671000 B

(45) 授权公告日 2016. 02. 17

(21) 申请号 201310590544. 3

(22) 申请日 2013. 11. 21

(73) 专利权人 中国科学院上海技术物理研究所
地址 200083 上海市虹口区玉田路 500 号

(72) 发明人 党海政

(74) 专利代理机构 上海新天专利代理有限公司
31213

代理人 郭英

(51) Int. Cl.

F04B 17/04(2006. 01)

(56) 对比文件

US 6209328 B1, 2001. 04. 03,

KR 10-0748546 B1, 2007. 08. 13,

CN 203627122 U, 2014. 06. 04,

KR 10-0769906 B1, 2007. 10. 24,
JP 特开平 11-22642 A, 1999. 01. 26,
李姗姗等. 脉冲管制冷机惯性管调相能力的
实验研究. 《低温工程》. 2011, (第 1 期),

审查员 余少文

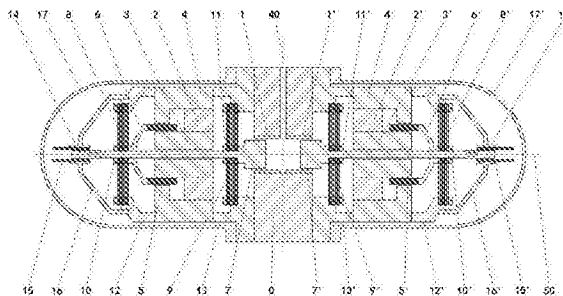
权利要求书4页 说明书11页 附图14页

(54) 发明名称

采用长线圈径向充磁的对置式动圈直线压缩机及制造方法

(57) 摘要

本发明公开了一种采用长线圈径向充磁的对置式动圈直线压缩机及制造方法, 整体结构采用对置式以抵消左右两部分的机械振动; 左部及右部除共用机座外, 均由各自的气缸衬套、永磁体、上轭铁、下轭铁、载流线圈、线圈骨架、活塞、上板弹簧组、下板弹簧组、上压片结构、下压片结构、上支撑结构、下支撑结构、位移传感器铁芯、位移传感器线圈、位移传感器支撑、机壳组成; 永磁体径向充磁, 载流线圈采用长线圈; 左部及右部的上轭铁、活塞以及载流线圈均需满足各自载流线圈的轴向高度大于各自下轭铁底部的轴向厚度与各自活塞的最大行程之和。本发明结构紧凑、振动低、电机效率高、预期寿命长, 对高可靠、长寿命、高效率直线压缩机的发展具有重要意义。



1. 一种采用长线圈径向充磁的对置式动圈直线压缩机,由共用机座(0)、左部气缸衬套(1)、左部永磁体(2)、左部上轭铁(3)、左部下轭铁(4)、左部载流线圈(5)、左部线圈骨架(6)、左部活塞(7)、左部上板弹簧组(8)、左部下板弹簧组(9)、左部上压片结构(10)、左部下压片结构(11)、左部上支撑结构(12)、左部下支撑结构(13)、左部位移传感器铁芯(14)、左部位移传感器线圈(15)、左部位移传感器支撑(16)、左部机壳(17)以及右部气缸衬套(1')、右部永磁体(2')、右部上轭铁(3')、右部下轭铁(4')、右部载流线圈(5')、右部线圈骨架(6')、右部活塞(7')、右部上板弹簧组(8')、右部下板弹簧组(9')、右部上压片结构(10')、右部下压片结构(11')、右部上支撑结构(12')、右部下支撑结构(13')、右部位移传感器铁芯(14')、右部位移传感器线圈(15')、右部位移传感器支撑(16')、右部机壳(17')共同组成,其特征在于,整体结构采用对置式以抵消左右两部分产生的机械振动,即以垂直中心线(40)为对称轴,左部所有部件及结构布置与右部相应部件及结构布置互为镜像体;水平轴线(50)所指示为轴向方向;共用机座(0)由左部气缸(41)、右部气缸(41')以及共用出气孔(42)组成;左部气缸衬套(1)过盈配合镶嵌于左部气缸(41)的内部,右部气缸衬套(1')过盈配合镶嵌于右部气缸(41')的内部;左部永磁体(2)为圆筒状结构,中心位置沿轴向加工有左部磁体内通孔(43);左部上轭铁(3)为圆筒状结构,其中心位置沿轴向加工有直径为 d 的左部上轭铁内通孔(44),左部上轭铁(3)的外径比左部磁体内通孔(43)的直径小 $2.0 \sim 3.0 \mu\text{m}$;左部下轭铁(4)为U型结构,U形体的内径比左部永磁体(2)的外径大 $2.0 \sim 3.0 \mu\text{m}$,在U形体底部的中心位置沿轴向加工有左部下轭铁内通孔(45),左部下轭铁内通孔(45)的直径大于左部上轭铁(3)的外径;左部永磁体(2)沿径向充磁至饱和,之后左部上轭铁(3)插入左部磁体内通孔(43)内部,左部下轭铁(4)将左部永磁体(2)及左部上轭铁(3)包裹其中,左部上轭铁左端面(18)与左部下轭铁左端面(19)齐平,左部上轭铁右端面(20)、左部永磁体右端面(22)以及左部下轭铁右端面(27)三者齐平;左部永磁体内环面(21)与左部上轭铁外环面(67)紧贴在一起,左部磁体环表面(68)与左部下轭铁内环面(23)紧贴在一起;左部永磁体(2)、左部上轭铁(3)、左部下轭铁(4)共同形成左部环状气隙(46),左部载流线圈(5)同心地插入左部环状气隙(46)内,右部永磁体(2')、右部上轭铁(3')、右部下轭铁(4')共同形成右部环状气隙(46'),右部载流线圈(5')同心地插入右部环状气隙(46')内;左部载流线圈(5)与右部载流线圈(5')的轴向高度均为 h ;左部活塞(7)与右部活塞(7')工作时的最大行程均为 s ;左部下轭铁(4)与右部下轭铁(4')底部的轴向厚度均为 δ ,并满足关系: $h > s + \delta$,以保证在整个活塞行程中,始终确保稳定磁场处在载流线圈之内;左上支撑右端面(24)支撑于左部下轭铁左端面(19)之上,二者通过螺钉紧固,左部上支撑结构(12)的左侧加工成上环状平面(25);左下支撑右端面(47)支撑于共用机座左侧面(48)之上,二者焊接在一起;左下支撑左前侧面(26)支撑于左部下轭铁右端面(27)之上,二者通过螺钉紧固,左部下支撑结构(13)的左下侧面加工成下环状平面(28);左部上板弹簧组(8)由若干单片板弹簧薄片叠加而成,在外缘形成左上组外缘(29),在内缘形成左上组内缘(30),在中心部位沿轴向加工有直径为 d 的左上组簧体中心孔(31),其中左上组外缘(29)放置于左部上支撑结构(12)的上环状平面(25)之上,并通过螺钉紧固;左部下板弹簧组9由若干单片板弹簧薄片叠加而成,在外缘形成左下组外缘(32),在内缘形成左下组内缘(33),在中心部位沿轴向加工有直径为 d 的左下组簧体中心孔(34),其中左下组外缘(32)放置

于左部下支撑结构 (13) 的下环状平面 (28) 之上,并通过螺钉紧固;左部活塞 (7) 由左部活塞头 (35)、左部活塞中间过渡台 (36) 以及左部活塞杆 (37) 组成,在左部活塞杆 (37) 的末端加工有长 $1 \sim 3\text{mm}$ 的左杆螺纹段 (49),左部活塞头 (35) 的外径较之左部气缸 (41) 的内径小 $10 \sim 30 \mu\text{m}$,同时保证左部活塞杆 (37) 的直径小于 d ;左部活塞杆 (37) 依次贯穿左下组簧体中心孔 (34)、左部下轭铁内通孔 (45)、左部上轭铁内通孔 (44)、左上组簧体中心孔 (31);左部上压片结构 (10) 将左上组内缘 (30) 以及左部线圈骨架 (6) 与左部活塞杆 (37) 紧固在一起,左部下压片结构 (11) 将左下组内缘 (33) 与左部活塞中间过渡台 (36) 紧固在一起,从而保证左部载流线圈 (5)、左部线圈骨架 (6) 与左部活塞 (7)、左部上板弹簧组 (8)、左部下板弹簧组 (9) 连接为一个可同时运动的整体;左部位移传感器铁芯 (14) 内部加工有与左杆螺纹段 (49) 相配合的左铁芯螺纹段 (51),左杆螺纹段 (49) 旋入左铁芯螺纹段 (51) 内并紧固;在左部位移传感器铁芯 (14) 之外设置与左部位移传感器支撑 (16) 紧固在一起的左部位移传感器线圈 (15),左部位移传感器支撑 (16) 进而支撑于左部上支撑结构 (12) 之上并与之紧固在一起;左部机壳 (17) 通过左部机壳外端面 (61) 与左下支撑外端面 (52) 焊接固定,从而形成左部密闭腔体,将左部气缸衬套 (1)、左部永磁体 (2)、左部上轭铁 (3)、左部下轭铁 (4)、左部载流线圈 (5)、左部线圈骨架 (6)、左部活塞 (7)、左部上板弹簧组 (8)、左部下板弹簧组 (9)、左部上压片结构 (10)、左部下压片结构 (11)、左部上支撑结构 (12)、左部下支撑结构 (13)、左部位移传感器铁芯 (14)、左部位移传感器线圈 (15)、左部位移传感器支撑 (16)、左部机壳 (17) 全部罩于其中;右部所有部件及结构布置是左部相应部件及结构布置关于垂直中心线 (40) 的镜像体,右部机壳 (17') 通过右部机壳外端面 (61') 与右下支撑外端面 (52') 焊接固定,形成右部密闭腔体,将右部气缸衬套 (1')、右部永磁体 (2')、右部上轭铁 (3')、右部下轭铁 (4')、右部载流线圈 (5')、右部线圈骨架 (6')、右部活塞 (7')、右部上板弹簧组 (8')、右部下板弹簧组 (9')、右部上压片结构 (10')、右部下压片结构 (11')、右部上支撑结构 (12')、右部下支撑结构 (13')、右部位移传感器铁芯 (14')、右部位移传感器线圈 (15')、右部位移传感器支撑 (16')、右部机壳 (17') 全部罩于其中,从而形成一种采用长线圈径向充磁的对置式动圈直线压缩机。

2. 一种如权利要求 1 所述采用长线圈径向充磁的对置式动圈直线压缩机的制造方法,其特征在于,以垂直中心线 (40) 为对称轴而互为镜像体的左部所有部件与右部相应部件需采用同一批次生产的零件以使个体间的差异最小化;共用机座 (0) 采用机械强度高、热膨胀系数小的钛合金材料制作,采用五轴机床同时加工出左部气缸 (41) 和右部气缸 (41'),保证左部气缸 (41) 和右部气缸 (41') 关于垂直中心线 (40) 对称,并保证左部气缸 (41) 和右部气缸 (41') 的同轴度优于 $1.0 \mu\text{m}$,同时保证上述两气缸的内孔圆度均优于 $0.5 \mu\text{m}$;在左部气缸 (41) 和右部气缸 (41') 加工完毕后,使用同一五轴机床加工出共用出气孔 (42),保证共用出气孔 (42) 与左部气缸 (41) 以及右部气缸 (41') 的垂直度均优于 $2.0 \mu\text{m}$;左部气缸衬套 (1) 及右部气缸衬套 (1') 均采用硬度大于 58 的模具钢材料使用慢走丝线切割的方法加工成圆筒状,保证左部气缸衬套 (1) 及右部气缸衬套 (1') 的外径分别比左部气缸 (41) 及右部气缸 (41') 的内径大 $0.5 \sim 1.0\text{mm}$,然后采用过盈配合和热胀冷缩的方式分别镶嵌入左部气缸 (41) 及右部气缸 (41') 内,具体镶嵌方法为:共用机座 (0) 整体放置于内部温度为 160°C 的恒温加热箱内均匀加热 $4 \sim 6$ 小时,在共用机座 (0) 取出恒温加热箱前 $5 \sim 10$ 分钟,将左部气缸衬套 (1) 及右部气缸衬套 (1') 同时放置于液

氮中浸泡,在共用机座(0)从恒温加热箱取出的同时,将左部气缸衬套(1)及右部气缸衬套(1')从液氮中取出,然后使用机械外力将左部气缸衬套(1)及右部气缸衬套(1')分别推入左部气缸(41)及右部气缸(41')内部,从而保证左部气缸衬套(1)及右部气缸衬套(1')的外壁分别与左部气缸(41)及右部气缸(41')的内壁紧密结合;然后使用坐标磨床对左部气缸衬套(1)及右部气缸衬套(1')的内孔进行精细研磨,保证其内孔圆度均优于 $0.5\mu\text{m}$;左部活塞(7)及右部活塞(7')均采用机械强度高、热膨胀系数小的钛合金材料制作,首先采用数控机床加工出毛坯,然后采用坐标磨床进行精细研磨,保证左部活塞头(35)及右部活塞头(35')的圆度均优于 $0.5\mu\text{m}$,并保证左部活塞杆(37)和右部活塞杆(37')沿轴向的跳动低于 $3.0\mu\text{m}$,以及左部活塞杆(37)与左部活塞头(35)的垂直度优于 $1.0\mu\text{m}$,右部活塞杆(37')与右部活塞头(35')的垂直度优于 $1.0\mu\text{m}$;在左部活塞杆(37)和右部活塞杆(37')的末端使用精密数控机床分别加工出左杆螺纹段(49)和右杆螺纹段(49');左部活塞(7)及右部活塞(7')工作时的最大行程均设计为 s ,由限位结构保证行程精度优于 $2.0\mu\text{m}$;左部上压片结构(10)、左部下压片结构(11)以及右部上压片结构(10')、右部下压片结构(11')均由机械强度高、剩磁低的金属材料采用数控机床加工制作而成,加工精度均优于 $9.0\mu\text{m}$;左部上板弹簧组(8)、左部下板弹簧组(9)以及右部上板弹簧组(8')、右部下板弹簧组(9')均由若干片薄片板弹簧叠加组成,单片薄片板弹簧的厚度和数量由具体应用所需要的弹性刚度决定,材质为铍青铜或不锈钢,采用光刻的方法精确加工出内部型线,内部型线是螺旋形,或者是直臂形,型线要求平滑、无毛刺、无折角,并通过板簧振动试验机进行超过 10^8 个循环以上的疲劳检验;内部型线为螺旋形的单片薄片板弹簧的制作方法为在薄片上以光刻法刻蚀出螺旋形型线(38),从而自然形成螺旋形板簧臂(39),外侧留出单片板弹簧外缘(53),并在其上以光刻法均匀刻蚀出若干用于螺钉固定的螺钉孔(54),在内侧留出单片板弹簧内缘(55);内部型线为直臂形的单片薄片板弹簧的制作方法为:在薄片上以光刻法刻蚀出直臂型板簧臂(56)以及运动臂(57),外侧留出单片板弹簧外缘(58),并在其上以光刻法均匀刻蚀出若干用于螺钉固定的螺钉孔(59),在内侧留出单片板弹簧内缘(60);左部上支撑结构(12)及左部下支撑结构(13)均由机械强度高、剩磁低的金属材料采用数控机床加工制作而成,加工精度均优于 $5.0\mu\text{m}$;左部上支撑结构(12)的左侧使用精密数控机床加工成上环状平面(25);左上支撑右端面(24)支撑于左部下轭铁左端面(19)之上,二者通过螺钉紧固;左下支撑右端面(47)支撑于共用机座左侧面(48)之上,二者通过电子束焊接技术焊接在一起,左下支撑左前侧面(26)支撑于左部下轭铁右端面(27)之上,二者通过螺钉紧固,左部下支撑结构(13)的左下侧面使用精密数控机床加工出下环状平面(28),左部下支撑结构(13)的左上侧面使用精密数控机床加工出左下支撑外端面(52);右部下支撑结构(13')由机械强度高、剩磁低的金属材料采用数控机床加工制作而成,加工精度优于 $5.0\mu\text{m}$,其右上侧面使用精密数控机床加工出右下支撑外端面(52');左部位移传感器铁芯(14)及右部位移传感器铁芯(14')均由纯铁材料制作,内部分别加工有与左杆螺纹段(49)及右杆螺纹段(49')相配合的左铁芯螺纹段(51)及右铁芯螺纹段(51'),左杆螺纹段(49)及右杆螺纹段(49')分别旋入左铁芯螺纹段(51)及右铁芯螺纹段(51')内并紧固;左部线圈骨架(6)、右部线圈骨架(6')、左部位移传感器支撑(16)、左部位移传感器支撑(16')均由机械强度高、剩磁低的金属材料采用数控机床加工制作而成,加工精度均优于 $9.0\mu\text{m}$;左部位移传感器线圈(15)及右部位

移传感器线圈(15')均由漆包铜线在相应骨架上绕制而成;左部永磁体(2)及右部永磁体(2')均采用磁能积高的稀土永磁材料制作,使用激光加工的方式加工成型,左部永磁体(2)及右部永磁体(2')均使用脉冲充磁机沿径向充磁至饱和;左部上轭铁(3)及右部上轭铁(3')均采用导磁率高的纯铁材料,使用精密数控机床加工而成,加工精度均优于 $8.0\mu\text{m}$;左部下轭铁(4)及右部下轭铁(4')均采用导磁率高的纯铁材料,使用精密数控机床加工而成,左部下轭铁(4)及右部下轭铁(4')底部的轴向厚度均为 δ ,加工精度均优于 $2.0\mu\text{m}$;左部载流线圈(5)及右部载流线圈(5')均采用漆包铜线在固体支撑上绕制而成,漆包铜线的直径和厚度由需要提供的电机力决定;左部载流线圈(5)与右部载流线圈(5')的轴向高度均为 h ,制作时由机床精度及绕制工艺保证 h 的精度优于 $2.0\mu\text{m}$;左部下轭铁(4)将左部永磁体(2)及左部上轭铁(3)包裹其中,共同形成左部环状气隙(46),左部载流线圈(5)同心地插入左部环状气隙(46)内;左部下轭铁(4')将左部永磁体(2')及左部上轭铁(3')包裹其中,共同形成右部环状气隙(46'),右部载流线圈(5')同心地插入右部环状气隙(46')内;左部上轭铁(3)、左部载流线圈(5)、左部活塞(7)以及右部上轭铁(3')与右部载流线圈(5')、右部活塞(7')在制作时均需保证满足各自载流线圈的轴向高度大于各自下轭铁底部的轴向厚度与各自活塞的最大行程之和,即: $h > s + \delta$,以保证在整个活塞行程中,始终确保稳定磁场处在载流线圈之内;左部机壳(17)及右部机壳(17')均由机械强度高、结构致密、剩磁低的金属材料使用精密数控机床加工制作成形;左部机壳外端面(61)与左下支撑外端面(52)使用电子束技术焊接在一起,形成左侧密闭腔体,右部机壳外端面(61')与右下支撑外端面(52')使用电子束技术焊接在一起,形成右侧密闭腔体,对上述两个焊接完毕的密闭腔体均充入高纯氦气检验,耐压强度均需高于 5.0MPa ,氦气泄漏率均需低于 $3.0 \times 10^{-8}\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

采用长线圈径向充磁的对置式动圈直线压缩机及制造方法

技术领域

[0001] 本发明涉及直线压缩机,特别涉及一种采用长线圈径向充磁的对置式动圈直线压缩机及其制造方法。

背景技术

[0002] 直线压缩机是往复式活塞压缩机的一种。传统的往复式活塞压缩机大多属于旋转压缩机,即采用旋转电机驱动、通过曲柄连杆机构等的机械传动来实现往复运动。旋转压缩机的技术较为成熟,但其能量传递环节多、振动和噪声大、整机控制复杂、能量转化效率偏低,特别是因结构特点而对活塞施加的侧向力,是产生无用功和机械磨损的主要来源之一,因而大大限制了其工作寿命。直线压缩机利用直线电机驱动活塞在气缸中作往复直线运动,理论上完全消除了对活塞的径向作用力,因而消除了活塞和气缸壁之间的机械磨损以及由此产生的无用功,工作寿命和能量转化效率都大大提高,故而在需要长寿命和高效率工作的航空、航天、军事等特殊领域有着非常重要的应用。

[0003] 直线压缩机的核心部件是直线电机。直线电机根据其中的运动部件主要分为三类:动铁式、动圈式和动磁式。动铁式直线电机不使用永磁体,因而价格较低廉,但是性能相对不稳定,控制较困难,其应用逐渐减少;动圈式和动磁式直线电机都包括三类核心部件:永磁体、轭铁和载流线圈,根据运动时是载流线圈还是永磁体运动而区分为动圈式和动磁式。其中,动圈式直线压缩机因其结构上的特点实现了径向力的完全消除,而且在开路时在载流线圈上不产生轴向力和扭矩,因而具有高效率、低噪声和高可靠的突出优点,因而成为近 30 年来国际范围内空间回热式低温制冷机(如脉冲管制冷机和斯特林制冷机)的首选动力源。以美国为代表的西方发达国家为例,在近 20 年间发射升空的航天脉冲管制冷机和斯特林制冷机中,绝大多数都采用了动圈式直线压缩机。

[0004] 目前,国际上应用于航天领域需要保证长寿命、高可靠、高效率工作的动圈式直线压缩机主要采用牛津型和对置式结构形式。所谓牛津型,其得名源于英国牛津大学的两项关键技术——间隙密封和板弹簧支撑,这两项技术是无油润滑而能长寿命运转的关键保障;所谓对置式结构形式,是指在主体结构中采用两个完全对等的运动及支撑结构来相互抵消自身产生的机械振动,该项技术是实现直线压缩机低振动的可靠保障。

[0005] 如前所述,动圈式直线电机包括三类核心部件:永磁体、轭铁和载流线圈。工作时载流线圈在永磁体和轭铁共同形成的气隙内,受磁场力的作用,成往复的直线运动。根据载流线圈的长短和永磁体的充磁方向,可以将动圈式直线电机分为四种,图 1 给出了这四种形式的示意图,其中(1)为长线圈轴向充磁形式,(2)为短线圈轴向充磁形式,(3)为长线圈径向充磁形式,(4)为短线圈径向充磁形式,其中 63 为永磁体,64 为上轭铁,65 为下轭铁,66 为载流线圈,67 为中心通孔。

[0006] 动圈式直线压缩机根据其采用的直线电机的种类,也被相应地分为四种形式,即:采用长线圈轴向充磁的动圈式直线压缩机、采用短线圈轴向充磁的动圈式直线压缩机、采用长线圈径向充磁的动圈式直线压缩机、采用短线圈径向充磁的动圈式直线压缩机。动圈

式直线压缩机无论采用上述四种形式中的哪一种,如果要确保其能稳定工作,都必须遵循以下基本原则:(1)要么是在整个活塞行程中,始终保证稳定磁场处在载流线圈之内(对应于长线圈形式);(2)要么是在整个活塞行程中,始终保证载流线圈处于稳定的磁场之内(对应于短线圈形式)。目前这四种形式的动圈式直线压缩机在国内的发展都刚刚起步。

发明内容

[0007] 本发明提出一种采用长线圈径向充磁的对置式动圈直线压缩机及其制造方法。

[0008] 所发明的采用长线圈径向充磁的对置式动圈直线压缩机由共用机座 0、左部气缸衬套 1、左部永磁体 2、左部上轭铁 3、左部下轭铁 4、左部载流线圈 5、左部线圈骨架 6、左部活塞 7、左部上板弹簧组 8、左部下板弹簧组 9、左部上压片结构 10、左部下压片结构 11、左部上支撑结构 12、左部下支撑结构 13、左部位移传感器铁芯 14、左部位移传感器线圈 15、左部位移传感器支撑 16、左部机壳 17 以及右部气缸衬套 1'、右部永磁体 2'、右部上轭铁 3'、右部下轭铁 4'、右部载流线圈 5'、右部线圈骨架 6'、右部活塞 7'、右部上板弹簧组 8'、右部下板弹簧组 9'、右部上压片结构 10'、右部下压片结构 11'、右部上支撑结构 12'、右部下支撑结构 13'、右部位移传感器铁芯 14'、右部位移传感器线圈 15'、右部位移传感器支撑 16'、右部机壳 17' 共同组成,其特征在于,整体结构采用对置式以抵消左右两部分产生的机械振动,即以垂直中心线 40 为对称轴,左部所有部件及结构布置与右部相应部件及结构布置互为镜像体;水平轴线 50 所指示为轴向方向;共用机座 0 由左部气缸 41、右部气缸 41' 以及共用出气孔 42 组成;左部气缸衬套 1 过盈配合镶嵌于左部气缸 41 的内部,右部气缸衬套 1' 过盈配合镶嵌于右部气缸 41' 的内部;左部永磁体 2 为圆筒状结构,中心位置沿轴向加工有左部磁体内通孔 43;左部上轭铁 3 为圆筒状结构,其中心位置沿轴向加工有直径为 d 的左部上轭铁内通孔 44,左部上轭铁 3 的外径比左部磁体内通孔 43 的直径小 $2.0 \sim 3.0 \mu\text{m}$;左部下轭铁 4 为 U 型结构,U 形体的内径比左部永磁体 2 的外径大 $2.0 \sim 3.0 \mu\text{m}$,在 U 形体底部的中心位置沿轴向加工有左部下轭铁内通孔 45,左部下轭铁内通孔 45 的直径大于左部上轭铁 3 的外径;左部永磁体 2 沿径向充磁至饱和,之后左部上轭铁 3 插入左部磁体内通孔 43 内部,左部下轭铁 4 将左部永磁体 2 及左部上轭铁 3 包裹其中,左部上轭铁左端面 18 与左部下轭铁左端面 19 齐平,左部上轭铁右端面 20、左部永磁体右端面 22 以及左部下轭铁右端面 27 三者齐平;左部永磁体内环面 21 与左部上轭铁外环面 67 紧贴在一起,左部磁体外表面 68 与左部下轭铁内环面 23 紧贴在一起;左部永磁体 2、左部上轭铁 3、左部下轭铁 4 共同形成左部环状气隙 46,左部载流线圈 5 同心地插入左部环状气隙 46 内,右部永磁体 2'、右部上轭铁 3'、右部下轭铁 4' 共同形成右部环状气隙 46',右部载流线圈 5' 同心地插入右部环状气隙 46' 内;左部载流线圈 5 与右部载流线圈 5' 的轴向高度均为 h ;左部活塞 7 与右部活塞 7' 工作时的最大行程均为 s ;左部下轭铁 4 与右部下轭铁 4' 底部的轴向厚度均为 δ ,并满足关系: $h > s + \delta$,以保证在整个活塞行程中,始终确保稳定磁场处在载流线圈之内;左上支撑右端面 24 支撑于左部下轭铁左端面 19 之上,二者通过螺钉紧固,左部上支撑结构 12 的左侧加工成上环状平面 25;左下支撑右端面 47 支撑于共用机座左侧面 48 之上,二者焊接在一起;左下支撑左前侧面 26 支撑于左部下轭铁右端面 27 之上,二者通过螺钉紧固,左部下支撑结构 13 的左下侧面加工成下环状平面 28;左部上板弹簧组 8 由若干单片板弹簧薄片叠加而成,在外缘形成左上组外缘 29,在内缘

形成左上组内缘 30, 在中心部位沿轴向加工有直径为 d 的左上组簧体中心孔 31, 其中左上组外缘 29 放置于左部上支撑结构 12 的上环状平面 25 之上, 并通过螺钉紧固; 左部下板弹簧组 9 由若干单片板弹簧薄片叠加而成, 在外缘形成左下组外缘 32, 在内缘形成左下组内缘 33, 在中心部位沿轴向加工有直径为 d 的左下组簧体中心孔 34, 其中左下组外缘 32 放置于左部下支撑结构 13 的下环状平面 28 之上, 并通过螺钉紧固; 左部活塞 7 由左部活塞头 35、左部活塞中间过渡台 36 以及左部活塞杆 37 组成, 在左部活塞杆 37 的末端加工有长 $1 \sim 3\text{mm}$ 的左杆螺纹段 49, 左部活塞头 35 的外径较之左部气缸 41 的内径小 $10 \sim 30 \mu\text{m}$, 同时保证左部活塞杆 37 的直径小于 d ; 左部活塞杆 37 依次贯穿左下组簧体中心孔 34、左部下轭铁内通孔 45、左部上轭铁内通孔 44、左上组簧体中心孔 31; 左部上压片结构 10 将左上组内缘 30 以及左部线圈骨架 6 与左部活塞杆 37 紧固在一起, 左部下压片结构 11 将左下组内缘 33 与左部活塞中间过渡台 36 紧固在一起, 从而保证左部载流线圈 5、左部线圈骨架 6 与左部活塞 7、左部上板弹簧组 8、左部下板弹簧组 9 连接为一个可同时运动的整体; 左部位移传感器铁芯 14 内部加工有与左杆螺纹段 49 相配合的左铁芯螺纹段 51, 左杆螺纹段 49 旋入左铁芯螺纹段 51 内并紧固; 在左部位移传感器铁芯 14 之外设置与左部位移传感器支撑 16 紧固在一起的左部位移传感器线圈 15, 左部位移传感器支撑 16 进而支撑于左部上支撑结构 12 之上并与之紧固在一起; 左部机壳 17 通过左部机壳外端面 61 与左下支撑外端面 52 焊接固定, 从而形成左部密闭腔体, 将左部气缸衬套 1、左部永磁体 2、左部上轭铁 3、左部下轭铁 4、左部载流线圈 5、左部线圈骨架 6、左部活塞 7、左部上板弹簧组 8、左部下板弹簧组 9、左部上压片结构 10、左部下压片结构 11、左部上支撑结构 12、左部下支撑结构 13、左部位移传感器铁芯 14、左部位移传感器线圈 15、左部位移传感器支撑 16、左部机壳 17 全部罩于其中; 右部所有部件及结构布置是左部相应部件及结构布置关于垂直中心线 40 的镜像体, 右部机壳 17' 通过右部机壳外端面 61' 与右下支撑外端面 52' 焊接固定, 形成右部密闭腔体, 将右部气缸衬套 1'、右部永磁体 2'、右部上轭铁 3'、右部下轭铁 4'、右部载流线圈 5'、右部线圈骨架 6'、右部活塞 7'、右部上板弹簧组 8'、右部下板弹簧组 9'、右部上压片结构 10'、右部下压片结构 11'、右部上支撑结构 12'、右部下支撑结构 13'、右部位移传感器铁芯 14'、右部位移传感器线圈 15'、右部位移传感器支撑 16'、右部机壳 17' 全部罩于其中, 从而形成一种采用长线圈径向充磁的对置式动圈直线压缩机。

[0009] 下面结合附图对所发明的采用长线圈径向充磁的对置式动圈直线压缩机的制造方法进行说明如下:

[0010] 图 2 为所发明的采用长线圈径向充磁的对置式动圈直线压缩机的平面剖视图; 以垂直中心线 40 为对称轴而互为镜像体的左部所有部件与右部相应部件需采用同一批次生产的零件以使个体间的差异最小化;

[0011] 图 3 为共用机座 0 的立体剖视图; 共用机座 0 采用机械强度高、热膨胀系数小的钛合金材料制作, 采用五轴机床同时加工出左部气缸 41 和右部气缸 41', 保证左部气缸 41 和右部气缸 41' 关于垂直中心线 40 对称, 并保证左部气缸 41 和右部气缸 41' 的同轴度优于 $1.0 \mu\text{m}$, 同时保证上述两气缸的内孔圆度均优于 $0.5 \mu\text{m}$; 在左部气缸 41 和右部气缸 41' 加工完毕后, 使用同一五轴机床加工出共用出气孔 42, 保证共用出气孔 42 与左部气缸 41 以及右部气缸 41' 的垂直度均优于 $2.0 \mu\text{m}$;

[0012] 图 4 为左部气缸衬套 1 的立体剖视图(对于左右互为镜像体的部件, 附图中一般

只给出左部的详细示意图,而制造方法则将左部和右部部件一同叙述,下同);左部气缸衬套 1 及右部气缸衬套 1' 均采用硬度大于 58 的模具钢材料使用慢走丝线切割的方法加工成圆筒状,保证左部气缸衬套 1 及右部气缸衬套 1' 的外径分别比左部气缸 41 及右部气缸 41' 的内径大 $0.5 \sim 1.0\text{mm}$,然后采用过盈配合和热胀冷缩的方式分别镶嵌入左部气缸 41 及右部气缸 41' 内,具体镶嵌方法如下:将如图 3 所示的共用机座 0 整体放置于内部温度为 160°C 的恒温加热箱内均匀加热 $4 \sim 6$ 小时,在共用机座 0 取出恒温加热箱前 $5 \sim 10$ 分钟,将左部气缸衬套 1 及右部气缸衬套 1' 同时放置于液氮中浸泡,在共用机座 0 从恒温加热箱取出的同时,将左部气缸衬套 1 及右部气缸衬套 1' 从液氮中取出,然后使用机械外力将左部气缸衬套 1 及右部气缸衬套 1' 分别推入左部气缸 41 及右部气缸 41' 内部,从而保证左部气缸衬套 1 及右部气缸衬套 1' 的外壁分别与左部气缸 41 及右部气缸 41' 的内壁紧密结合;然后使用坐标磨床对左部气缸衬套 1 及右部气缸衬套 1' 的内孔进行精细研磨,保证其内孔圆度均优于 $0.5\mu\text{m}$;

[0013] 图 5 为左部活塞 7 的平面剖视图;左部活塞 7 及右部活塞 7' 均采用机械强度高、热膨胀系数小的钛合金材料制作,首先采用数控机床加工出毛坯,然后采用坐标磨床进行精细研磨,保证左部活塞头 35 及右部活塞头 35' 的圆度均优于 $0.5\mu\text{m}$,并保证左部活塞杆 37 和右部活塞杆 37' 沿轴向的跳动低于 $3.0\mu\text{m}$,以及左部活塞杆 37 与左部活塞头 35 的垂直度优于 $1.0\mu\text{m}$,右部活塞杆 37' 与右部活塞头 35' 的垂直度优于 $1.0\mu\text{m}$;在左部活塞杆 37 和右部活塞杆 37' 的末端使用精密数控机床分别加工出左杆螺纹段 49 和右杆螺纹段 49';左部活塞 7 及右部活塞 7' 工作时的最大行程均设计为 s ,由限位结构保证行程精度优于 $2.0\mu\text{m}$;

[0014] 图 6 为左部上板弹簧组 8 与左部上压片结构 10 的组合示意图,图 7 为左部下板弹簧组 9 与左部下压片结构 11 的组合示意图;左部上压片结构 10、左部下压片结构 11 以及右部上压片结构 10'、右部下压片结构 11' 均由机械强度较高、剩磁较低金属材料采用数控机床加工制作而成,加工精度均优于 $9.0\mu\text{m}$;左部上板弹簧组 8、左部下板弹簧组 9 以及右部上板弹簧组 8'、右部下板弹簧组 9' 均由若干片薄片板弹簧叠加组成,单片薄片板弹簧的厚度和数量由具体应用所需要的弹性刚度决定,材质为铍青铜或不锈钢,采用光刻的方法精确加工出内部型线,内部型线可以是螺旋形,也可以是直臂形,型线要求平滑、无毛刺、无折角,并通过板簧振动试验机进行超过 10^8 个循环以上的疲劳检验;

[0015] 内部型线为螺旋形的单片薄片板弹簧的示意图如图 8 所示,在薄片上以光刻法刻蚀出螺旋形型线 38,从而自然形成螺旋形板簧臂 39,外侧留出单片板弹簧外缘 53,并在其上以光刻法均匀刻蚀出若干用于螺钉固定的螺钉孔 54,在内侧留出单片板弹簧内缘 55;

[0016] 内部型线为直臂形的单片薄片板弹簧的示意图如图 9 所示,在薄片上以光刻法刻蚀出直臂型板簧臂 56 以及运动臂 57,外侧留出单片板弹簧外缘 58,并在其上以光刻法均匀刻蚀出若干用于螺钉固定的螺钉孔 59,在内侧留出单片板弹簧内缘 60;

[0017] 图 10 和图 11 分别为左部上支撑结构 12 和左部下支撑结构 13 的平面剖视图;左部上支撑结构 12 及左部下支撑结构 13 均由机械强度较高、剩磁较低的金属材料采用数控机床加工制作而成,加工精度均优于 $5.0\mu\text{m}$;左部上支撑结构 12 的左侧使用精密数控机床加工成上环状平面 25;左上支撑右端面 24 支撑于左部下轭铁左端面 19 之上,二者通过螺钉紧固;左下支撑右端面 47 支撑于共用机座左侧面 48 之上,二者通过电子束焊接技术焊接

在一起,左下支撑左前侧面 26 支撑于左部下轭铁右端面 27 之上,二者通过螺钉紧固,左部下支撑结构 13 的左下侧面使用精密数控机床加工出下环状平面 28,左部下支撑结构 13 的左上侧面使用精密数控机床加工出左下支撑外端面 52;

[0018] 图 12 为右部下支撑结构 13' 的平面剖视图;右部下支撑结构 13' 由机械强度较高、剩磁较低的金属材料采用数控机床加工制作而成,加工精度优于 $5.0\ \mu\text{m}$,其右上侧面使用精密数控机床加工出左下支撑外端面 52' ;

[0019] 图 13 为左部位移传感器铁芯 14 的平面剖视图;左部位移传感器铁芯 14 及右部位移传感器铁芯 14' 均由纯铁材料制作,内部分别加工有与左杆螺纹段 49 及右杆螺纹段 49' 相配合的左铁芯螺纹段 51 及右铁芯螺纹段 51',左杆螺纹段 49 及右杆螺纹段 49' 分别旋入左铁芯螺纹段 51 及右铁芯螺纹段 51' 内并紧固;

[0020] 左部线圈骨架 6、右部线圈骨架 6'、左部位移传感器支撑 16、左部位移传感器支撑 16' 均由机械强度较高、剩磁较低的金属材料采用数控机床加工制作而成,加工精度均优于 $9.0\ \mu\text{m}$;左部位移传感器线圈 15 及右部位移传感器线圈 15' 均由漆包铜线在相应骨架上绕制而成;

[0021] 图 14 为左部永磁体 2 的平面剖视图;左部永磁体 2 及右部永磁体 2' 均采用磁能积较高的稀土永磁材料制作,使用激光加工的方式加工成型;左部永磁体 2 及右部永磁体 2' 均使用脉冲充磁机沿径向充磁至饱和;

[0022] 图 15 为左部上轭铁 3 的平面剖视图;左部上轭铁 3 及右部上轭铁 3' 均采用导磁率较高的纯铁材料,使用精密数控机床加工而成,加工精度均优于 $8.0\ \mu\text{m}$;

[0023] 图 16 为左部下轭铁 4 的平面剖视图;左部下轭铁 4 及右部下轭铁 4' 均采用导磁率较高的纯铁材料,使用精密数控机床加工而成,左部下轭铁 4 及右部下轭铁 4' 底部的轴向厚度均为 δ ,加工精度均优于 $2.0\ \mu\text{m}$;

[0024] 图 17 为左部载流线圈 5 的示意图;左部载流线圈 5 及右部载流线圈 5' 均采用漆包铜线在固体支撑上绕制而成,漆包铜线的直径和厚度由需要提供的电机力决定;左部载流线圈 5 与右部载流线圈 5' 的轴向高度均为 h ,制作时由机床精度及绕制工艺保证 h 的精度优于 $2.0\ \mu\text{m}$;

[0025] 图 18 为左部永磁体 2、左部上轭铁 3、左部下轭铁 4 以及左部载流线圈 5 的组合平面剖视图;左部下轭铁 4 将左部永磁体 2 及左部上轭铁 3 包裹其中,共同形成左部环状气隙 46,左部载流线圈 5 同心地插入左部环状气隙 46 内;左部下轭铁 4' 将左部永磁体 2' 及左部上轭铁 3' 包裹其中,共同形成右部环状气隙 46',右部载流线圈 5' 同心地插入右部环状气隙 46' 内;左部上轭铁 3、左部载流线圈 5、左部活塞 7 以及右部上轭铁 3' 与右部载流线圈 5'、右部活塞 7' 在制作时均需保证满足各自载流线圈的轴向高度大于各自下轭铁底部的轴向厚度与各自活塞的最大行程之和,即 $h > s + \delta$,以保证在整个活塞行程中,始终确保稳定磁场处在载流线圈之内;

[0026] 图 19 和图 20 分别为左部机壳 17 及右部机壳 17' 的平面剖视图;左部机壳 17 及右部机壳 17' 均由机械强度高、结构致密、剩磁较低的金属材料使用精密数控机床加工制作成形;左部机壳外端面 61 与左下支撑外端面 52 使用电子束技术焊接在一起,形成左侧密闭腔体;右部机壳外端面 61' 与右下支撑外端面 52' 使用电子束技术焊接在一起,形成右部密闭腔体,对上述两个焊接完毕的密闭腔体均充入高纯氦气检验,耐压强度均需高于

5.0MPa,氦气泄漏率均需低于 $3.0 \times 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

[0027] 本发明的优点在于:以长线圈和径向充磁的方式实现了动圈直线压缩机的稳定、可靠和连续运转,具有结构紧凑、振动低、电机效率高、预期寿命长的突出优点,对高可靠、长寿命、高效率直线压缩机的发展具有重要意义。

附图说明

[0028] 图1为动圈式直线电机四种形式的示意图,其中(1)为长线圈轴向充磁形式,(2)为短线圈轴向充磁形式,(3)为长线圈径向充磁形式,(4)为短线圈径向充磁形式。其中63为永磁体,64为上轭铁,65为下轭铁,66为载流线圈,67为中心通孔;

[0029] 图2为所发明的采用长线圈径向充磁的对置式动圈直线压缩机的平面剖视图,其中:0为共用机座、1为左部气缸衬套、2为左部永磁体、3为左部上轭铁、4为左部下轭铁、5为左部载流线圈、6为左部线圈骨架、7为左部活塞、8为左部上板弹簧组、9为左部下板弹簧组、10为左部上压片结构、11为左部下压片结构、12为左部上支撑结构、13为左部下支撑结构、14为左部位移传感器铁芯、15为左部位移传感器线圈、16为左部位移传感器支撑、17为左部机壳;1'为右部气缸衬套、2'为右部永磁体、3'为右部上轭铁、4'为右部下轭铁、5'为右部载流线圈、6'为右部线圈骨架、7'为右部活塞、8'为右部上板弹簧组、9'为右部下板弹簧组、10'为右部上压片结构、11'为右部下压片结构、12'为右部上支撑结构、13'为右部下支撑结构、14'为右部位移传感器铁芯、15'为右部位移传感器线圈、16'为右部位移传感器支撑、17'为右部机壳;

[0030] 图3为共用机座0的立体剖视图,其中41为左部气缸,41'为右部气缸,42为共用出气孔,48为共用机座左侧面;

[0031] 图4为左部气缸衬套1的立体剖视图;

[0032] 图5为左部活塞7的平面剖视图,其中35为左部活塞头,36为左部活塞中间过渡台,37为左部活塞杆,49为左杆螺纹段;

[0033] 图6为左部上板弹簧组8与左部上压片结构10的组合示意图,其中29为左上组外缘,30为左上组内缘,左上组簧体中心孔31;

[0034] 图7为左部下板弹簧组9与左部下压片结构11的组合示意图,其中32为左下组外缘,33为左下组内缘,34为左下组簧体中心孔;

[0035] 图8为内部型线为螺旋形的单片薄片板弹簧的示意图,其中38为螺旋形型线,39为螺旋形板簧臂,53为单片板弹簧外缘,54为螺钉孔,55为单片板弹簧内缘;

[0036] 图9为内部型线为直臂形的单片薄片板弹簧的示意图,其中56为直臂型板簧臂,57为运动臂,58为单片板弹簧外缘,59为螺钉孔,60为单片板弹簧内缘;

[0037] 图10为左部上支撑结构12的平面剖视图,其中24为左上支撑右端面,25为上环状平面;

[0038] 图11为左部下支撑结构13的平面剖视图,其中26为左下支撑左前侧面,28为下环状平面,47为左下支撑右端面,52为左下支撑外端面;

[0039] 图12为右部下支撑结构13'的平面剖视图,其中52'为右下支撑外端面;

[0040] 图13为左部位移传感器铁芯14的平面剖视图,其中51为左铁芯螺纹段;

[0041] 图14为左部永磁体2的平面剖视图,其中21为左部磁体内环面;22为左部永磁

体右端面 ;43 为左部磁体内通孔,68 为左部磁体外环面 ;

[0042] 图 15 为左部上轭铁 3 的平面剖视图,其中 18 为左部上轭铁左端面 ;20 为左部上轭铁右端面 ;44 为左部上轭铁内通孔,67 为左部上轭铁外环面 ;

[0043] 图 16 为左部下轭铁 4 的平面剖视图,其中 19 为左部下轭铁左端面 ;23 为左部下轭铁内环面,27 为左部下轭铁右端面 ;45 为左部下轭铁内通孔 ;

[0044] 图 17 为左部载流线圈 5 的示意图 ;

[0045] 图 18 为左部永磁体 2、左部上轭铁 3、左部下轭铁 4 以及左部载流线圈 5 的组合平面剖视图,其中 46 为左部环状气隙 ;

[0046] 图 19 为左部机壳 17 的平面剖视图,其中 61 为左部机壳外端面,62 为左部机壳体 ;

[0047] 图 20 为右部机壳 17' 的平面剖视图,其中 61' 为右部机壳外端面,62' 为右部机壳体。

具体实施方式

[0048] 下面结合附图及实施例对本发明的具体实施方式作进一步地详细说明 :

[0049] 所发明的采用长线圈径向充磁的对置式动圈直线压缩机由共用机座 0、左部气缸衬套 1、左部永磁体 2、左部上轭铁 3、左部下轭铁 4、左部载流线圈 5、左部线圈骨架 6、左部活塞 7、左部上板弹簧组 8、左部下板弹簧组 9、左部上压片结构 10、左部下压片结构 11、左部上支撑结构 12、左部下支撑结构 13、左部位移传感器铁芯 14、左部位移传感器线圈 15、左部位移传感器支撑 16、左部机壳 17 以及右部气缸衬套 1'、右部永磁体 2'、右部上轭铁 3'、右部下轭铁 4'、右部载流线圈 5'、右部线圈骨架 6'、右部活塞 7'、右部上板弹簧组 8'、右部下板弹簧组 9'、右部上压片结构 10'、右部下压片结构 11'、右部上支撑结构 12'、右部下支撑结构 13'、右部位移传感器铁芯 14'、右部位移传感器线圈 15'、右部位移传感器支撑 16'、右部机壳 17' 共同组成,其特征在于,整体结构采用对置式以抵消左右两部分产生的机械振动,即以垂直中心线 40 为对称轴,左部所有部件及结构布置与右部相应部件及结构布置互为镜像体 ;水平轴线 50 所指示为轴向方向 ;共用机座 0 由左部气缸 41、右部气缸 41' 以及共用出气孔 42 组成 ;左部气缸衬套 1 过盈配合镶嵌于左部气缸 41 的内部,右部气缸衬套 1' 过盈配合镶嵌于右部气缸 41' 的内部 ;左部永磁体 2 为圆筒状结构,中心位置沿轴向加工有左部磁体内通孔 43 ;左部上轭铁 3 为圆筒状结构,其中心位置沿轴向加工有直径为 d 的左部上轭铁内通孔 44,左部上轭铁 3 的外径比左部磁体内通孔 43 的直径小 $2.5 \mu\text{m}$;左部下轭铁 4 为 U 型结构,U 形体的内径比左部永磁体 2 的外径大 $2.5 \mu\text{m}$,在 U 形体底部的中心位置沿轴向加工有左部下轭铁内通孔 45,左部下轭铁内通孔 45 的直径大于左部上轭铁 3 的外径 ;左部永磁体 2 沿径向充磁至饱和,之后左部上轭铁 3 插入左部磁体内通孔 43 内部,左部下轭铁 4 将左部永磁体 2 及左部上轭铁 3 包裹其中,左部上轭铁左端面 18 与左部下轭铁左端面 19 齐平,左部上轭铁右端面 20、左部永磁体右端面 22 以及左部下轭铁右端面 27 三者齐平 ;左部永磁体内环面 21 与左部上轭铁外环面 67 紧贴在一起,左部磁体外表面 68 与左部下轭铁内环面 23 紧贴在一起 ;左部永磁体 2、左部上轭铁 3、左部下轭铁 4 共同形成左部环状气隙 46,左部载流线圈 5 同心地插入左部环状气隙 46 内,右部永磁体 2'、右部上轭铁 3'、右部下轭铁 4' 共同形成右部环状气隙 46',右部载流线圈 5' 同心地插入右部环状气隙 46' 内 ;左部载流线圈 5 与右部载流线圈 5' 的轴向高度均为 h ;

左部活塞 7 与右部活塞 7' 工作时的最大行程均为 s ;左部下轭铁 4 与右部下轭铁 4' 底部的轴向厚度均为 δ ,并满足关系 : $h > s + \delta$,以保证在整个活塞行程中,始终确保稳定磁场处在载流线圈之内 ;左上支撑右端面 24 支撑于左部下轭铁左端面 19 之上,二者通过螺钉紧固,左部上支撑结构 12 的左侧加工成上环状平面 25 ;左下支撑右端面 47 支撑于共用机座左侧面 48 之上,二者焊接在一起 ;左下支撑左前侧面 26 支撑于左部下轭铁右端面 27 之上,二者通过螺钉紧固,左部下支撑结构 13 的左下侧面加工成下环状平面 28 ;左部上板弹簧组 8 由若干单片板弹簧薄片叠加而成,在外缘形成左上组外缘 29,在内缘形成左上组内缘 30,在中心部位沿轴向加工有直径为 d 的左上组簧体中心孔 31,其中左上组外缘 29 放置于左部上支撑结构 12 的上环状平面 25 之上,并通过螺钉紧固 ;左部下板弹簧组 9 由若干单片板弹簧薄片叠加而成,在外缘形成左下组外缘 32,在内缘形成左下组内缘 33,在中心部位沿轴向加工有直径为 d 的左下组簧体中心孔 34,其中左下组外缘 32 放置于左部下支撑结构 13 的下环状平面 28 之上,并通过螺钉紧固 ;左部活塞 7 由左部活塞头 35、左部活塞中间过渡台 36 以及左部活塞杆 37 组成,在左部活塞杆 37 的末端加工有长 2mm 的左杆螺纹段 49,左部活塞头 35 的外径较之左部气缸 41 的内径小 $20 \mu\text{m}$,同时保证左部活塞杆 37 的直径小于 d ;左部活塞杆 37 依次贯穿左下组簧体中心孔 34、左部下轭铁内通孔 45、左部上轭铁内通孔 44、左上组簧体中心孔 31 ;左部上压片结构 10 将左上组内缘 30 以及左部线圈骨架 6 与左部活塞杆 37 紧固在一起,左部下压片结构 11 将左下组内缘 33 与左部活塞中间过渡台 36 紧固在一起,从而保证左部载流线圈 5、左部线圈骨架 6 与左部活塞 7、左部上板弹簧组 8、左部下板弹簧组 9 连接为一个可同时运动的整体 ;左部位移传感器铁芯 14 内部加工有与左杆螺纹段 49 相配合的左铁芯螺纹段 51,左杆螺纹段 49 旋入左铁芯螺纹段 51 内并紧固 ;在左部位移传感器铁芯 14 之外设置与左部位移传感器支撑 16 紧固在一起的左部位移传感器线圈 15,左部位移传感器支撑 16 进而支撑于左部上支撑结构 12 之上并与之紧固在一起 ;左部机壳 17 通过左部机壳外端面 61 与左下支撑外端面 52 焊接固定,从而形成左部密闭腔体,将左部气缸衬套 1、左部永磁体 2、左部上轭铁 3、左部下轭铁 4、左部载流线圈 5、左部线圈骨架 6、左部活塞 7、左部上板弹簧组 8、左部下板弹簧组 9、左部上压片结构 10、左部下压片结构 11、左部上支撑结构 12、左部下支撑结构 13、左部位移传感器铁芯 14、左部位移传感器线圈 15、左部位移传感器支撑 16、左部机壳 17 全部罩于其中 ;右部所有部件及结构布置是左部相应部件及结构布置关于垂直中心线 40 的镜像体,右部机壳 17' 通过右部机壳外端面 61' 与右下支撑外端面 52' 焊接固定,形成右部密闭腔体,将右部气缸衬套 1'、右部永磁体 2'、右部上轭铁 3'、右部下轭铁 4'、右部载流线圈 5'、右部线圈骨架 6'、右部活塞 7'、右部上板弹簧组 8'、右部下板弹簧组 9'、右部上压片结构 10'、右部下压片结构 11'、右部上支撑结构 12'、右部下支撑结构 13'、右部位移传感器铁芯 14'、右部位移传感器线圈 15'、右部位移传感器支撑 16'、右部机壳 17' 全部罩于其中,从而形成一种采用长线圈径向充磁的对置式动圈直线压缩机。

[0050] 图 2 为所发明的采用长线圈径向充磁的对置式动圈直线压缩机的平面剖视图 ;以垂直中心线 40 为对称轴而互为镜像体的左部所有部件与右部相应部件需采用同一批次生产的零件以使个体间的差异最小化 ;

[0051] 图 3 为共用机座 0 的立体剖视图 ;共用机座 0 采用机械强度高、热膨胀系数小的钛合金材料制作,采用五轴机床同时加工出左部气缸 41 和右部气缸 41' ,保证左部气缸 41 和

右部气缸 41' 关于垂直中心线 40 对称, 并保证左部气缸 41 和右部气缸 41' 的同轴度优于 $1.0\ \mu\text{m}$, 同时保证上述两气缸的内孔圆度均优于 $0.5\ \mu\text{m}$; 在左部气缸 41 和右部气缸 41' 加工完毕后, 使用同一五轴机床加工出共用出气孔 42, 保证共用出气孔 42 与左部气缸 41 以及右部气缸 41' 的垂直度均优于 $2.0\ \mu\text{m}$;

[0052] 图 4 为左部气缸衬套 1 的立体剖视图(对于左右互为镜像体的部件, 附图一般只给出左部的详细示意图, 而制造方法则将左部和右部部件一同叙述, 下同); 左部气缸衬套 1 及右部气缸衬套 1' 均采用硬度大于 58 的模具钢材料使用慢走丝线切割的方法加工成圆筒状, 保证左部气缸衬套 1 及右部气缸衬套 1' 的外径分别比左部气缸 41 及右部气缸 41' 的内径大 0.6mm , 然后采用过盈配合和热胀冷缩的方式分别镶嵌入左部气缸 41 及右部气缸 41' 内, 具体镶嵌方法如下: 将如图 3 所示的共用机座 0 整体放置于内部温度为 160°C 的恒温加热箱内均匀加热 5 小时, 在共用机座 0 取出恒温加热箱前 6 分钟, 将左部气缸衬套 1 及右部气缸衬套 1' 同时放置于液氮中浸泡, 在共用机座 0 从恒温加热箱取出的同时, 将左部气缸衬套 1 及右部气缸衬套 1' 从液氮中取出, 然后使用机械外力将左部气缸衬套 1 及右部气缸衬套 1' 分别推入左部气缸 41 及右部气缸 41' 内部, 从而保证左部气缸衬套 1 及右部气缸衬套 1' 的外壁分别与左部气缸 41 及右部气缸 41' 的内壁紧密结合; 然后使用坐标磨床对左部气缸衬套 1 及右部气缸衬套 1' 的内孔进行精细研磨, 保证其内孔圆度均优于 $0.5\ \mu\text{m}$;

[0053] 图 5 为左部活塞 7 的平面剖视图; 左部活塞 7 及右部活塞 7' 均采用机械强度高、热膨胀系数小的钛合金材料制作, 首先采用数控机床加工出毛坯, 然后采用坐标磨床进行精细研磨, 保证左部活塞头 35 及右部活塞头 35' 的圆度均优于 $0.5\ \mu\text{m}$, 并保证左部活塞杆 37 和右部活塞杆 37' 沿轴向的跳动低于 $3.0\ \mu\text{m}$, 以及左部活塞杆 37 与左部活塞头 35 的垂直度优于 $1.0\ \mu\text{m}$, 右部活塞杆 37' 与右部活塞头 35' 的垂直度优于 $1.0\ \mu\text{m}$; 在左部活塞杆 37 和右部活塞杆 37' 的末端使用精密数控机床分别加工出左杆螺纹段 49 和右杆螺纹段 49'; 左部活塞 7 及右部活塞 7' 工作时的最大行程均设计为 s , 由限位结构保证行程精度优于 $2.0\ \mu\text{m}$;

[0054] 图 6 为左部上板弹簧组 8 与左部上压片结构 10 的组合示意图, 图 7 为左部下板弹簧组 9 与左部下压片结构 11 的组合示意图; 左部上压片结构 10、左部下压片结构 11 以及右部上压片结构 10'、右部下压片结构 11' 均由机械强度较高、剩磁较低的金属材料采用数控机床加工制作而成, 加工精度均优于 $9.0\ \mu\text{m}$; 左部上板弹簧组 8、左部下板弹簧组 9 以及右部上板弹簧组 8'、右部下板弹簧组 9' 均由若干片薄片板弹簧叠加组成, 单片薄片板弹簧的厚度和数量由具体应用所需要的弹性刚度决定, 材质为铍青铜或不锈钢, 采用光刻的方法精确加工出内部型线, 内部型线可以是螺旋形, 也可以是直臂形, 型线要求平滑、无毛刺、无折角, 并通过板簧振动试验机进行超过 10^8 个循环以上的疲劳检验;

[0055] 内部型线为螺旋形的单片薄片板弹簧的示意图如图 8 所示, 在薄片上以光刻法刻蚀出螺旋形型线 38, 从而自然形成螺旋形板簧臂 39, 外侧留出单片板弹簧外缘 53, 并在其上以光刻法均匀刻蚀出若干用于螺钉固定的螺钉孔 54, 在内侧留出单片板弹簧内缘 55;

[0056] 内部型线为直臂形的单片薄片板弹簧的示意图如图 9 所示, 在薄片上以光刻法刻蚀出直臂型板簧臂 56 以及运动臂 57, 外侧留出单片板弹簧外缘 58, 并在其上以光刻法均匀刻蚀出若干用于螺钉固定的螺钉孔 59, 在内侧留出单片板弹簧内缘 60;

[0057] 图 10 和图 11 分别为左部上支撑结构 12 和左部下支撑结构 13 的平面剖视图；左部上支撑结构 12 及左部下支撑结构 13 均由机械强度较高、剩磁较低的金属材料采用数控机床加工制作而成，加工精度均优于 $5.0\ \mu\text{m}$ ；左部上支撑结构 12 的左侧使用精密数控机床加工成上环状平面 25；左上支撑右端面 24 支撑于左部下轭铁左端面 19 之上，二者通过螺钉紧固；左下支撑右端面 47 支撑于共用机座左侧面 48 之上，二者通过电子束焊接技术焊接在一起，左下支撑左前侧面 26 支撑于左部下轭铁右端面 27 之上，二者通过螺钉紧固，左部下支撑结构 13 的左下侧面使用精密数控机床加工出下环状平面 28，左部下支撑结构 13 的左上侧面使用精密数控机床加工出左下支撑外端面 52；

[0058] 图 12 为右部下支撑结构 13' 的平面剖视图；右部下支撑结构 13' 由机械强度较高、剩磁较低的金属材料采用数控机床加工制作而成，加工精度优于 $5.0\ \mu\text{m}$ ，其右上侧面使用精密数控机床加工出左下支撑外端面 52'；

[0059] 图 13 为左部位移传感器铁芯 14 的平面剖视图；左部位移传感器铁芯 14 及右部位移传感器铁芯 14' 均由纯铁材料制作，内部分别加工有与左杆螺纹段 49 及右杆螺纹段 49' 相配合的左铁芯螺纹段 51 及右铁芯螺纹段 51'，左杆螺纹段 49 及右杆螺纹段 49' 分别旋入左铁芯螺纹段 51 及右铁芯螺纹段 51' 内并紧固；

[0060] 左部线圈骨架 6、右部线圈骨架 6'、左部位移传感器支撑 16、左部位移传感器支撑 16' 均由机械强度较高、剩磁较低的金属材料采用数控机床加工制作而成，加工精度均优于 $9.0\ \mu\text{m}$ ；左部位移传感器线圈 15 及右部位移传感器线圈 15' 均由漆包铜线在相应骨架上绕制而成；

[0061] 图 14 为左部永磁体 2 的平面剖视图；左部永磁体 2 及右部永磁体 2' 均采用磁能积较高的稀土永磁材料制作，使用激光加工的方式加工成型，左部永磁体 2 及右部永磁体 2' 均使用脉冲充磁机沿径向充磁至饱和；

[0062] 图 15 为左部上轭铁 3 的平面剖视图；左部上轭铁 3 及右部上轭铁 3' 均采用导磁率较高的纯铁材料，使用精密数控机床加工而成，

[0063] 图 16 为左部下轭铁 4 的平面剖视图；左部下轭铁 4 及右部下轭铁 4' 均采用导磁率较高的纯铁材料，使用精密数控机床加工而成，左部下轭铁 4 及右部下轭铁 4' 底部的轴向厚度均为 δ ，加工精度均优于 $2.0\ \mu\text{m}$ ；

[0064] 图 17 为左部载流线圈 5 的示意图；左部载流线圈 5 及右部载流线圈 5' 均采用漆包铜线在固体支撑上绕制而成，漆包铜线的直径和厚度由需要提供的电机力决定；左部载流线圈 5 与右部载流线圈 5' 的轴向高度均为 h ，制作时由机床精度及绕制工艺保证 h 的精度优于 $2.0\ \mu\text{m}$ ；

[0065] 图 18 为左部永磁体 2、左部上轭铁 3、左部下轭铁 4 以及左部载流线圈 5 的组合平面剖视图；左部下轭铁 4 将左部永磁体 2 及左部上轭铁 3 包裹其中，共同形成左部环状气隙 46，左部载流线圈 5 同心地插入左部环状气隙 46 内；左部下轭铁 4' 将左部永磁体 2' 及左部上轭铁 3' 包裹其中，共同形成右部环状气隙 46'，右部载流线圈 5' 同心地插入右部环状气隙 46' 内；左部上轭铁 3、左部载流线圈 5、左部活塞 7 以及右部上轭铁 3' 与右部载流线圈 5'、右部活塞 7' 在制作时均需保证满足各自载流线圈的轴向高度大于各自下轭铁底部的轴向厚度与各自活塞的最大行程之和，即： $h > s + \delta$ ，以保证在整个活塞行程中，始终确保稳定磁场处在载流线圈之内；

[0066] 图 19 和图 20 分别为左部机壳 17 及右部机壳 17' 的平面剖视图；左部机壳 17 及右部机壳 17' 均由机械强度高、结构致密、剩磁较低的金属材料使用精密数控机床加工制作成形；左部机壳外端面 61 与左下支撑外端面 52 使用电子束技术焊接在一起，形成左侧密闭腔体；右部机壳外端面 61' 与右下支撑外端面 52' 使用电子束技术焊接在一起，形成右部密闭腔体，对上述两个焊接完毕的密闭腔体均充入高纯氦气检验，耐压强度均需高于 5.0MPa，氦气泄漏率均需低于 $3.0 \times 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

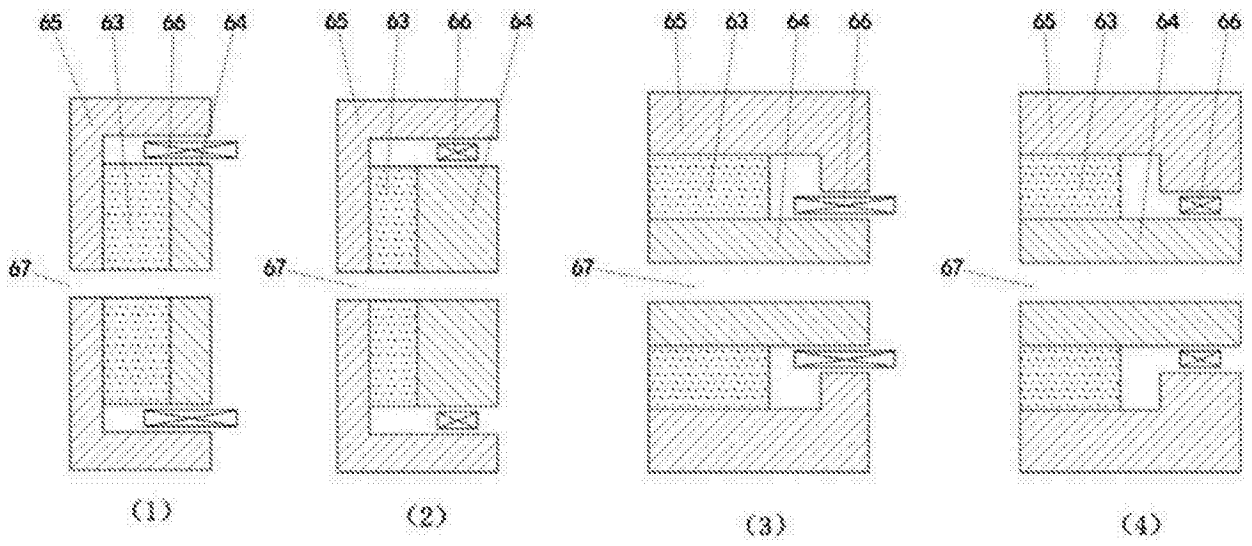


图 1

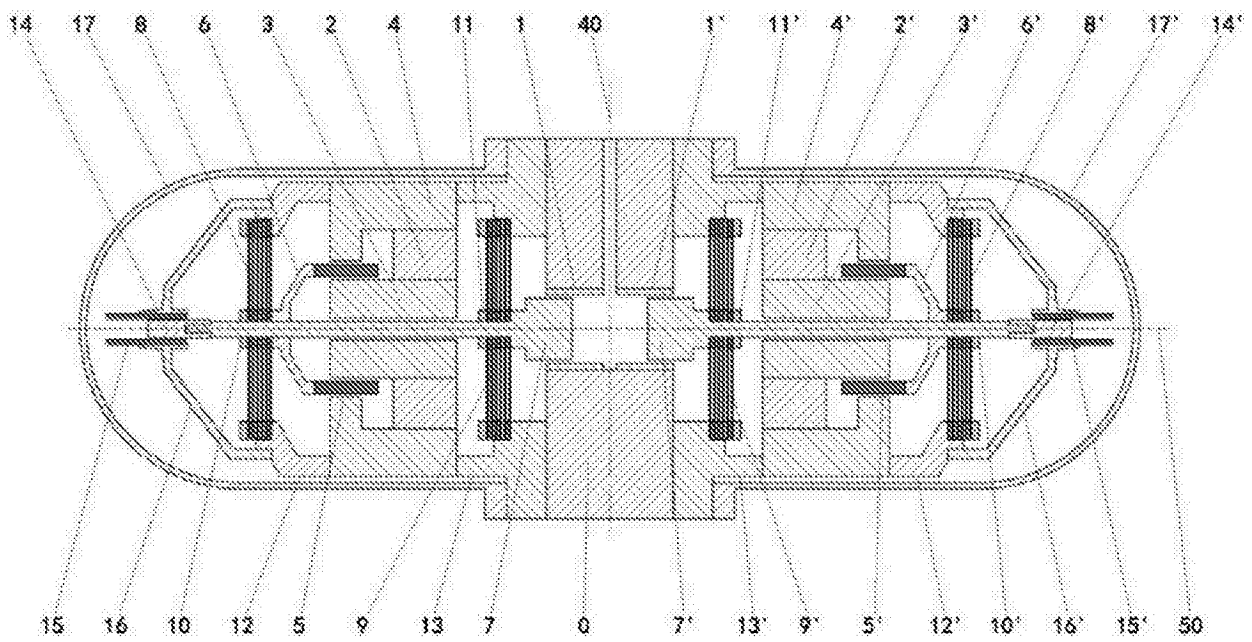


图 2

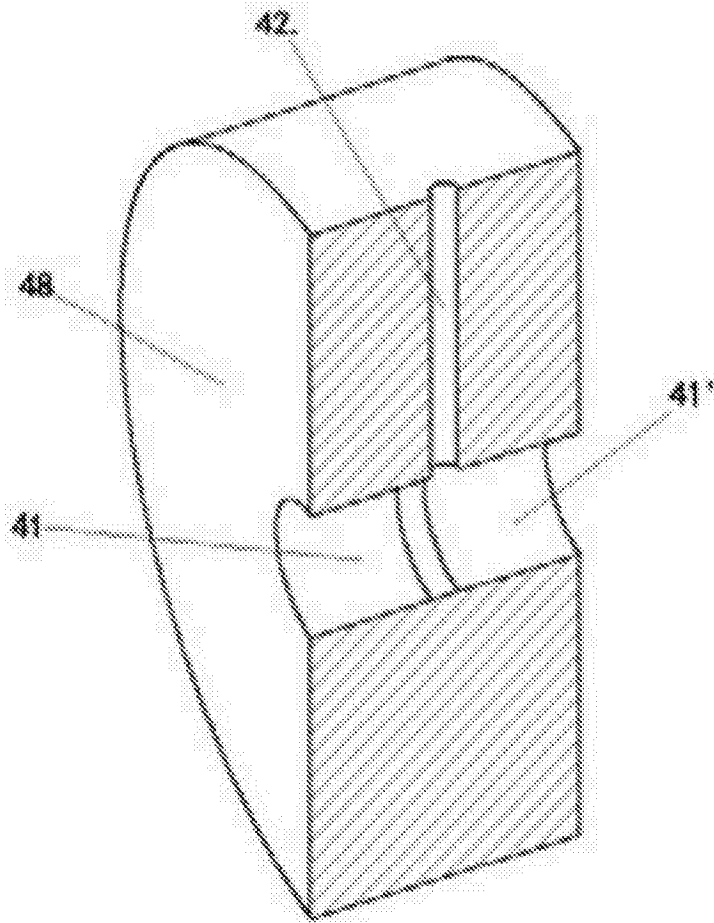


图 3

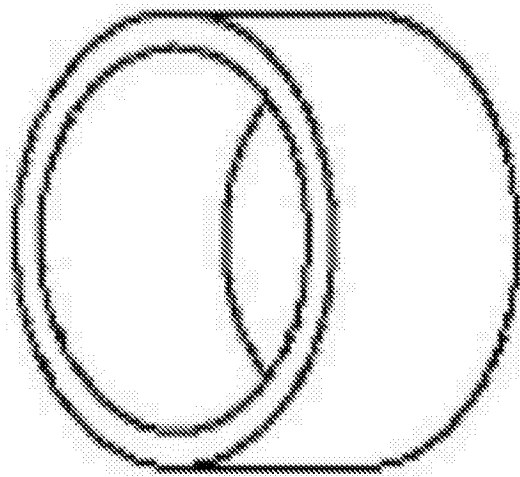


图 4

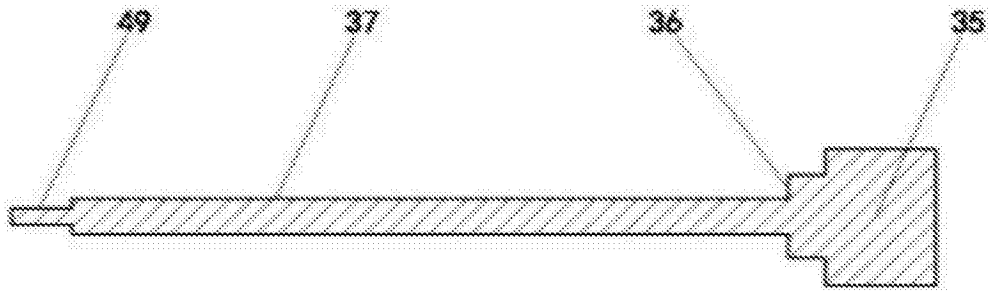


图 5

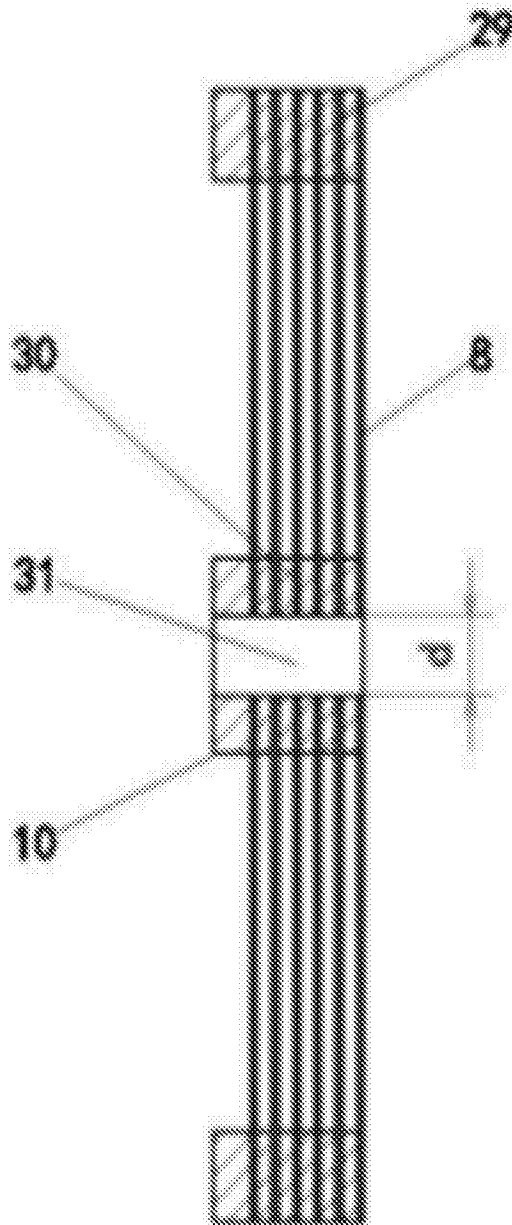


图 6

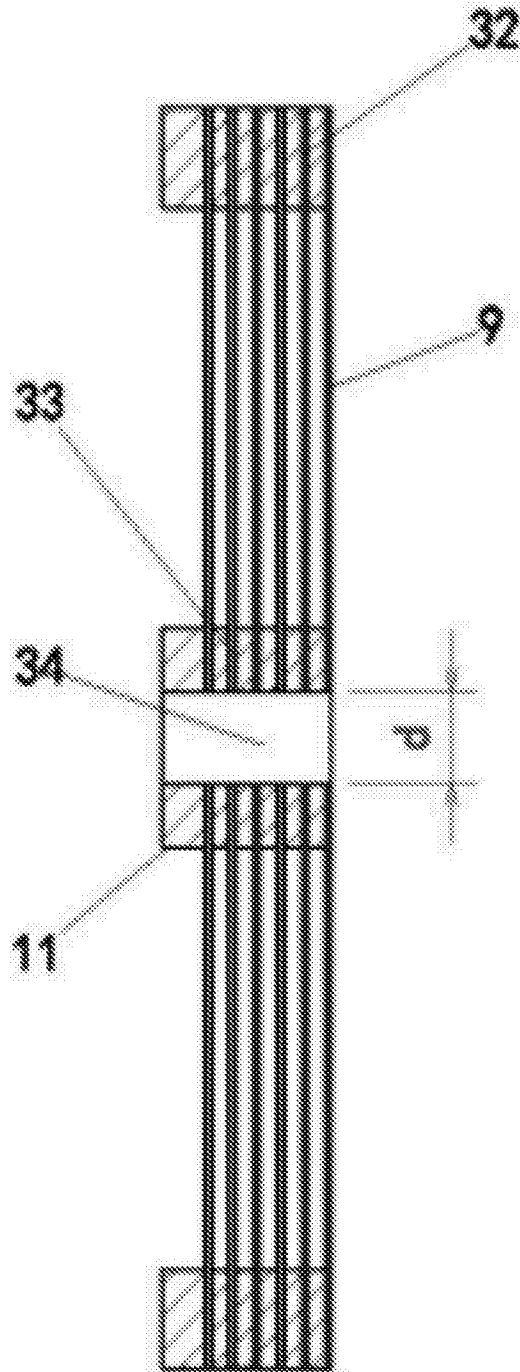


图 7

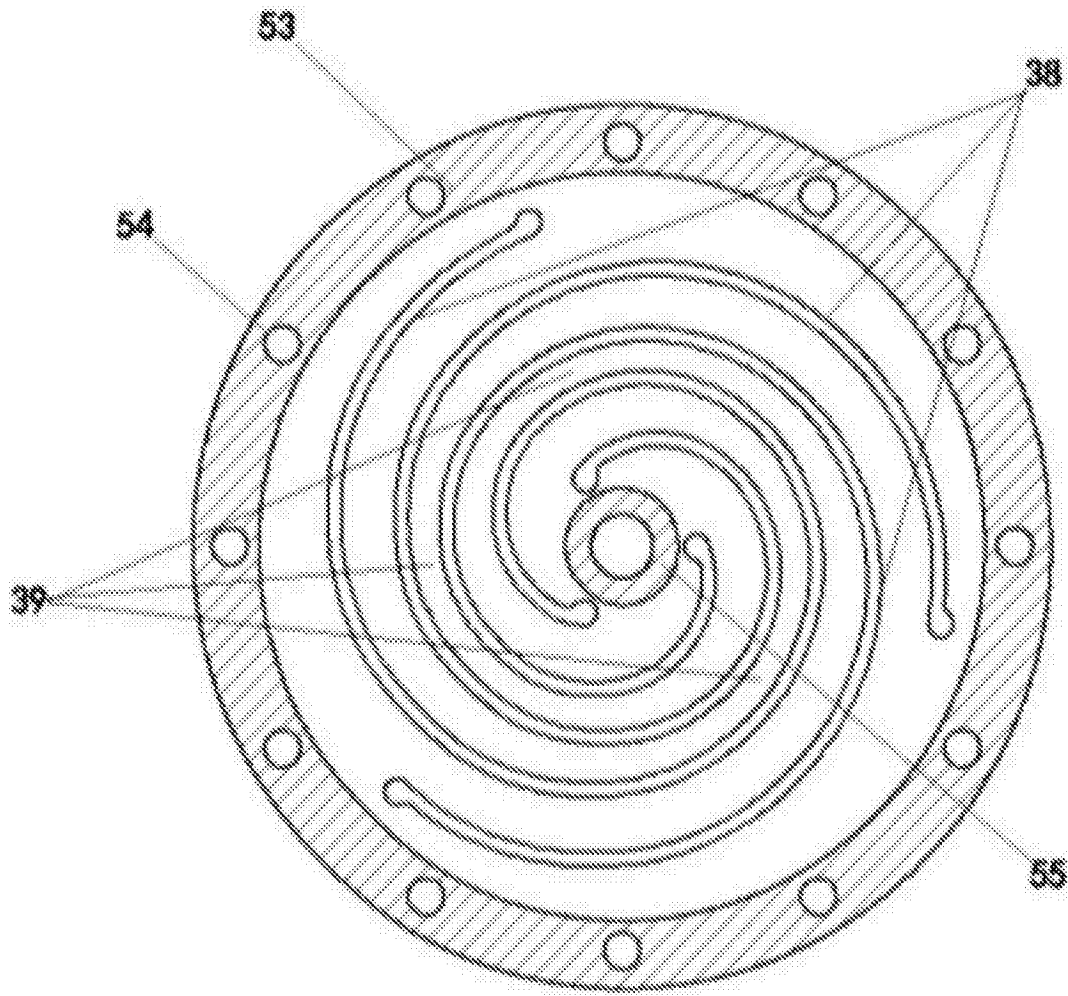


图 8

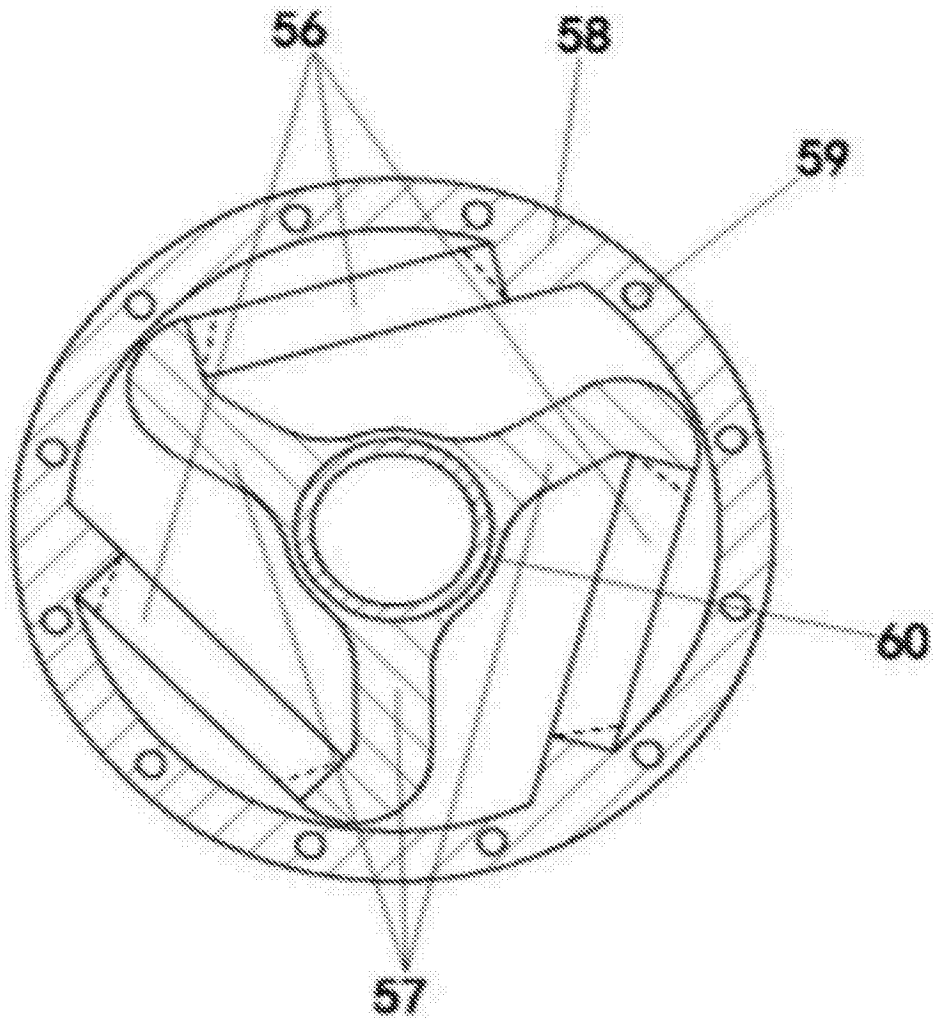


图 9

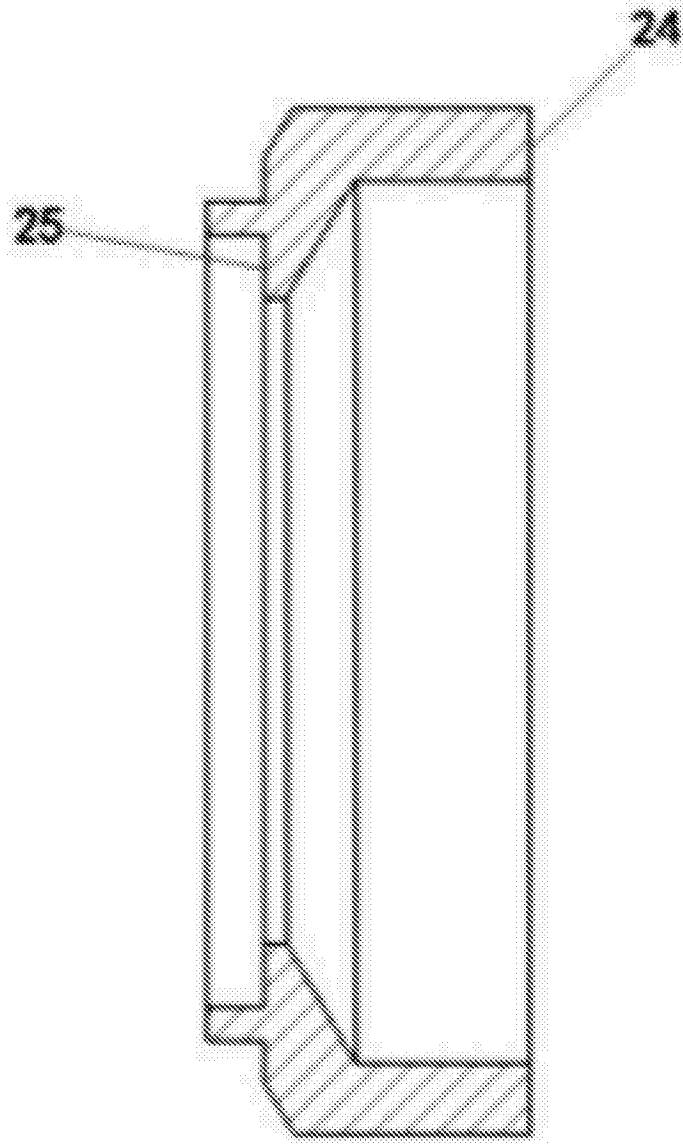


图 10

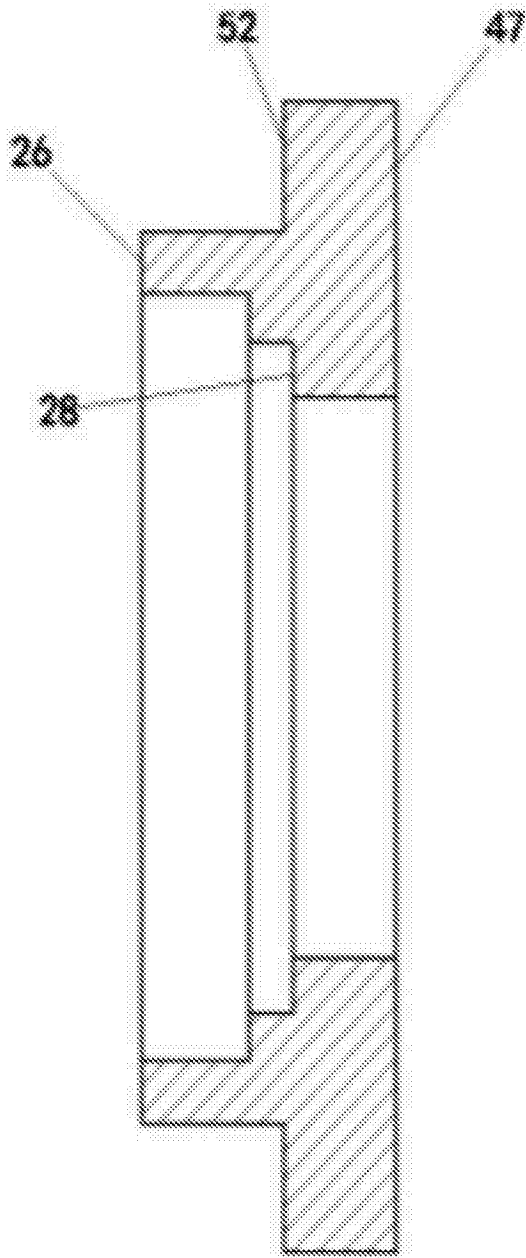


图 11

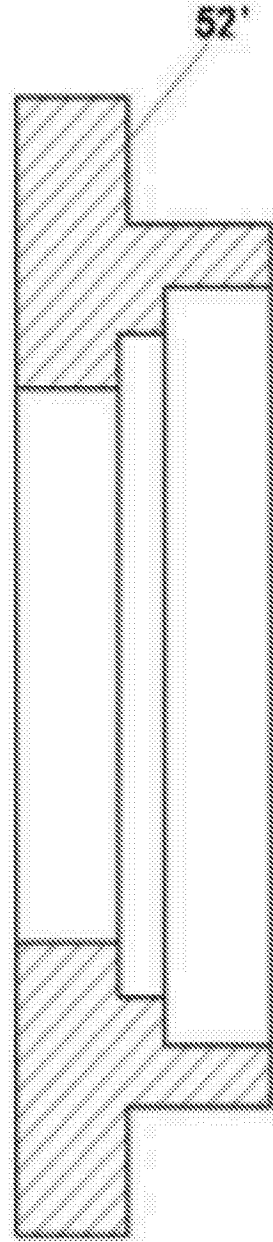


图 12

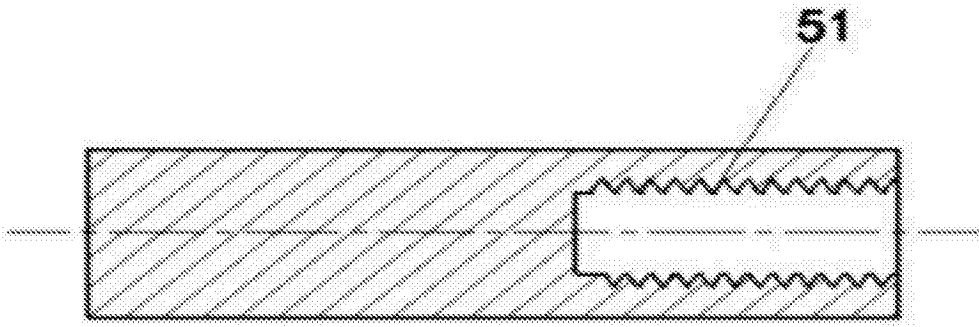


图 13

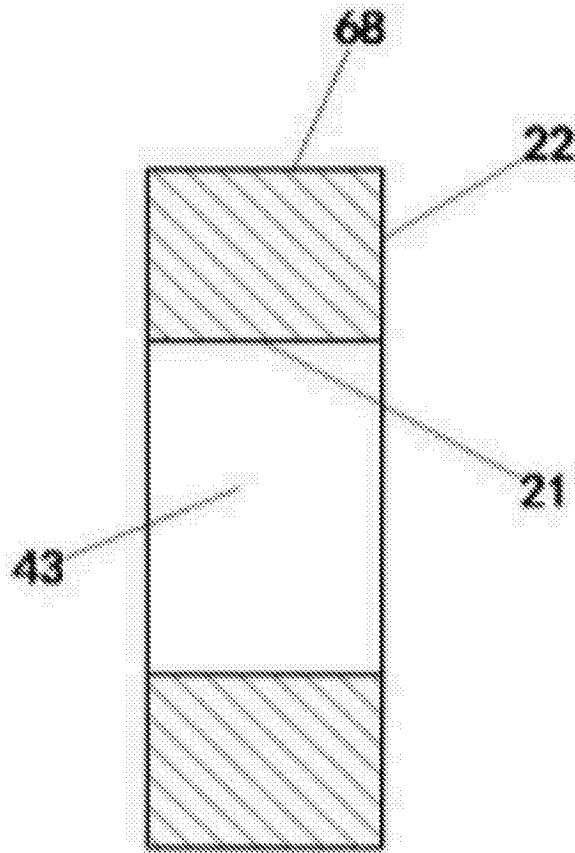


图 14

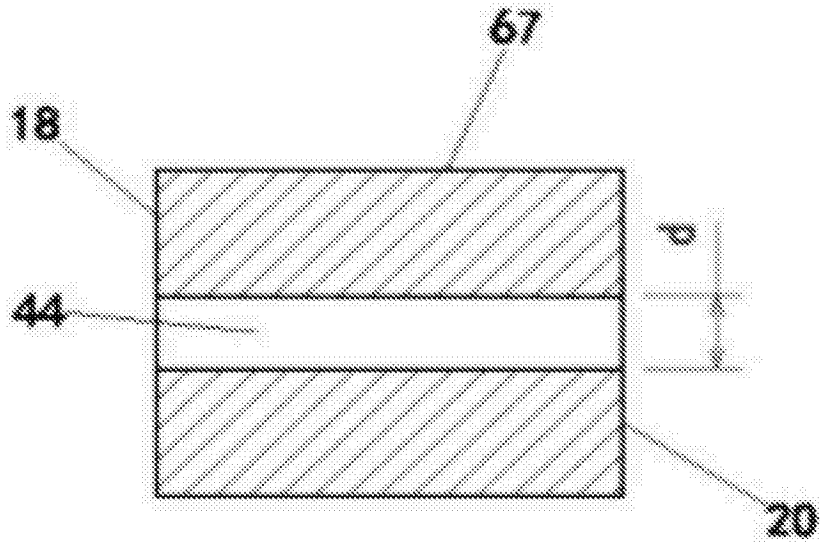


图 15

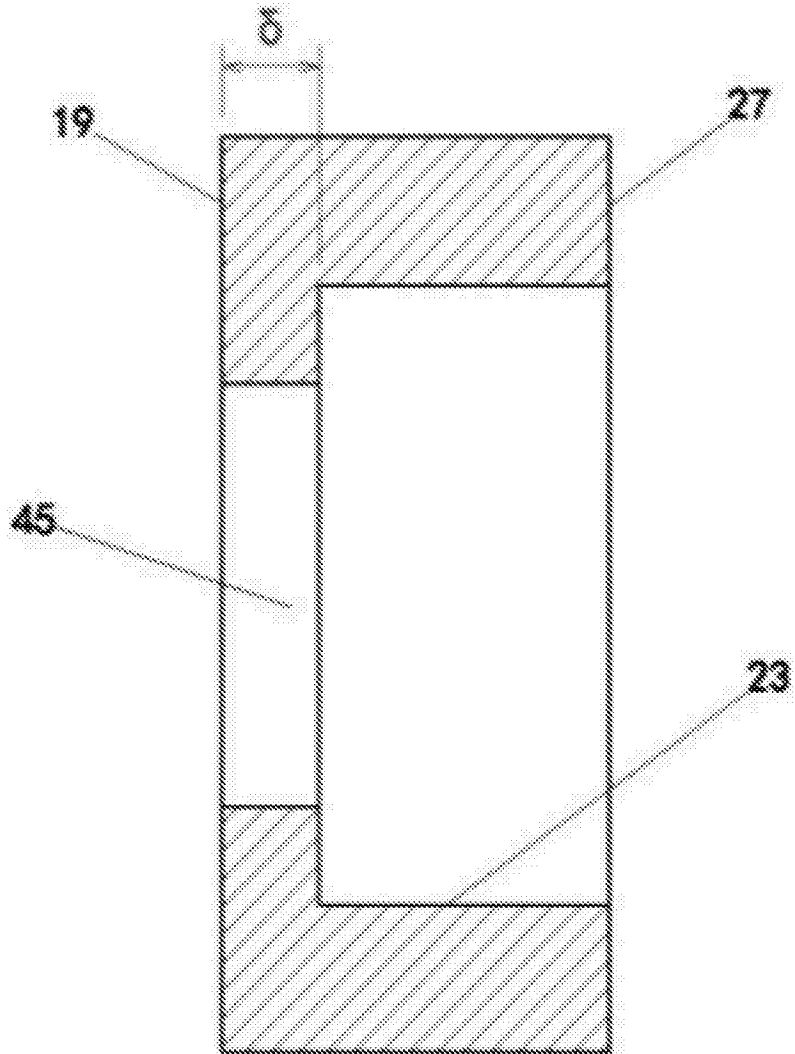


图 16

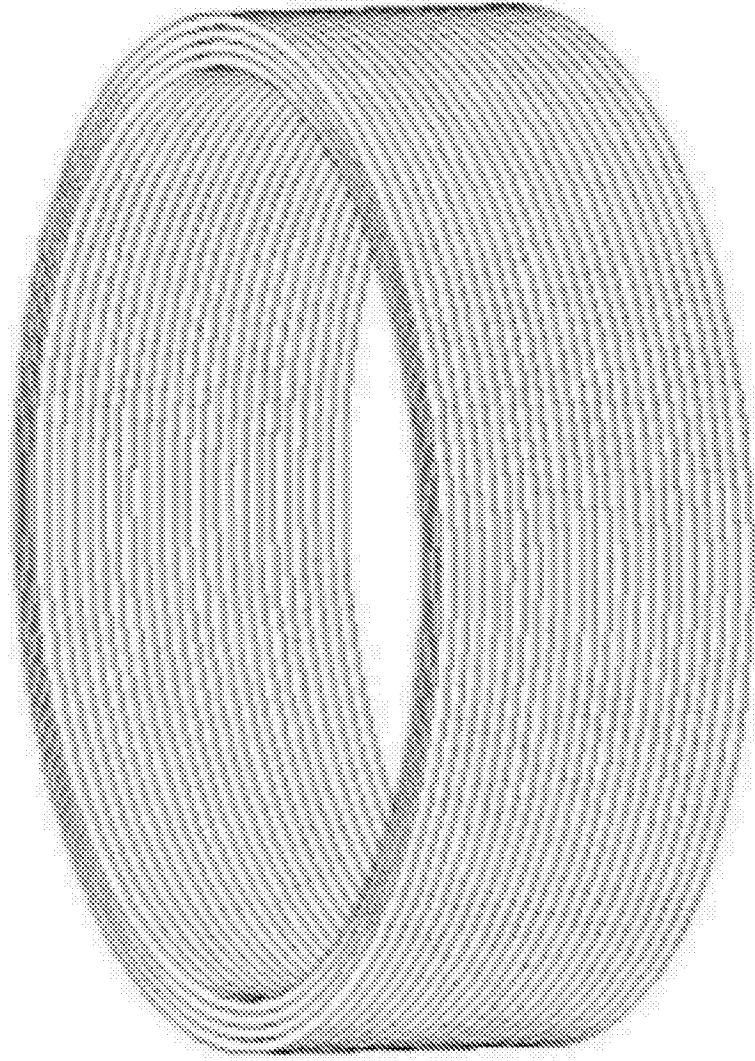


图 17

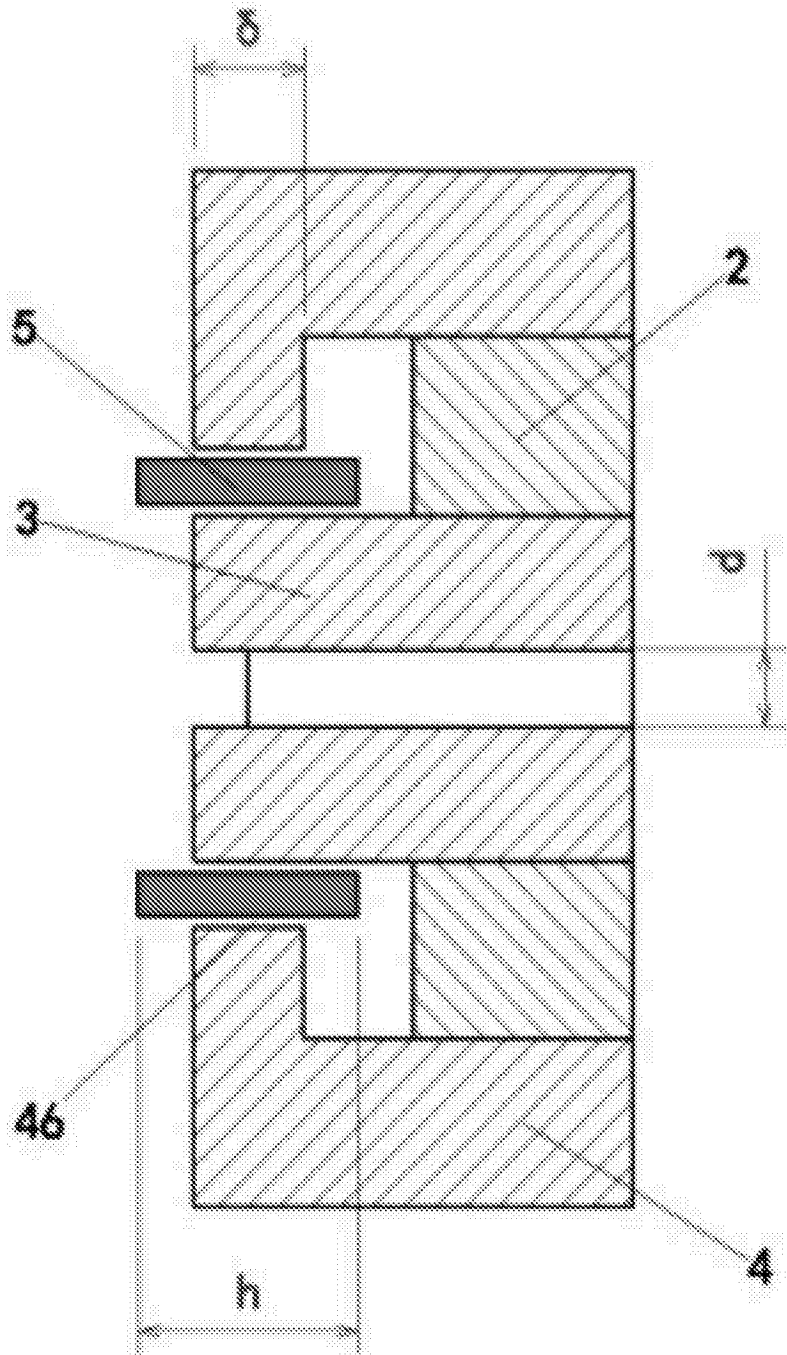


图 18

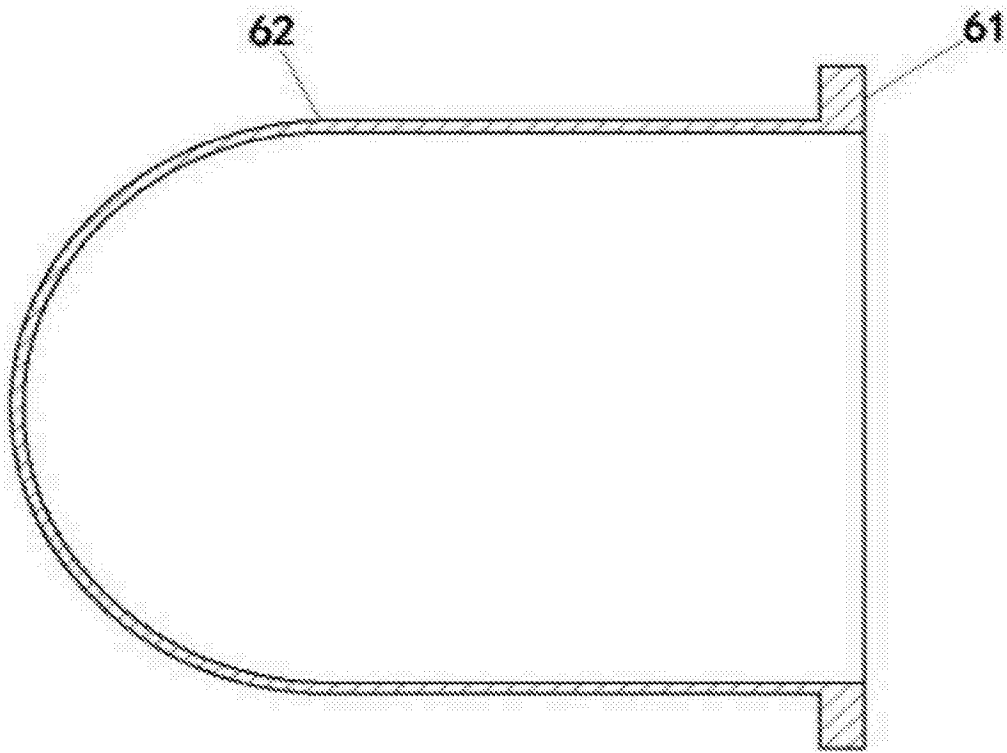


图 19

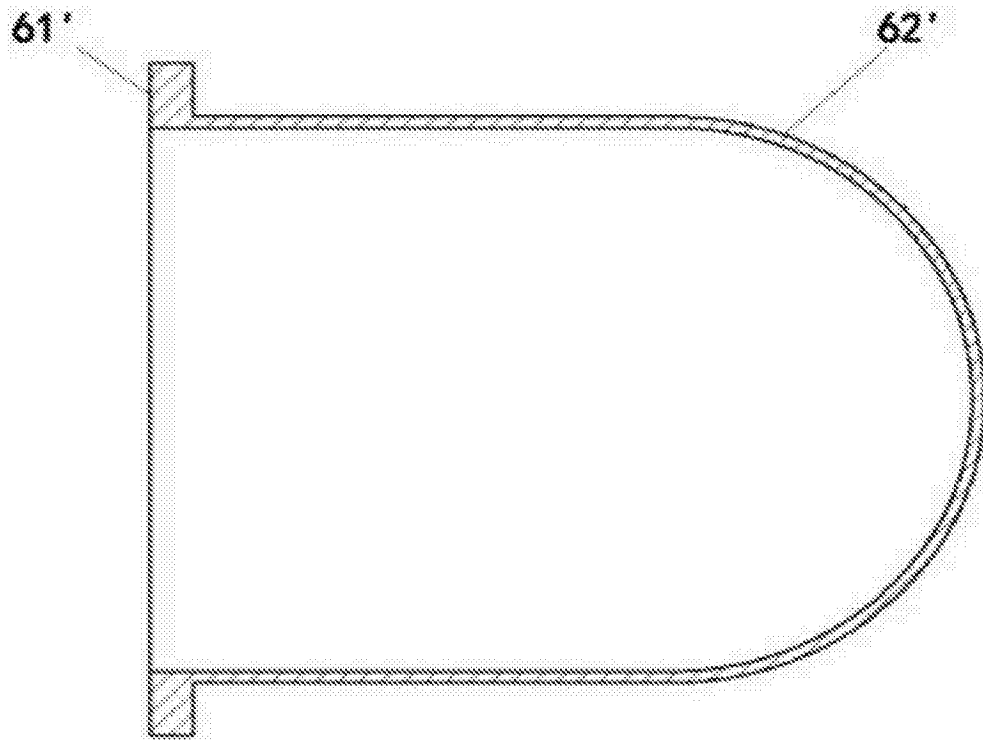


图 20