

LSK—3型离子束刻蚀机的结构设计

谈治信 惠金河

(兰州物理研究所)

内容提要: LSK—3型离子束刻蚀机是用于刻蚀动压气体轴承螺旋槽为主的超精细加工专用设备。自1985年研制成功后,该机经过上百次长期使用运转,成功地刻蚀了台阶轴套、半球轴套、上推板螺旋轮等器件,每次开机连续工作10h,连续刻蚀时间8h以上。实践证明:该机工作可靠、稳定、技术成熟。是一台国内领先的离子束刻蚀设备。对该机的设计原理、真空系统计算、结构特点、发展前景作以介绍。

主题词: 离子束刻蚀、精细加工、真空技术。

LSK—3型离子束刻蚀机是用于刻蚀动压气体轴承螺旋槽为主的专用设备。它是在吸取LSK—1型、2型、2A型和国内外同类设备优点的基础上确立了新的结构方案而研制成功的。该机具有卧式和立式真空室的特点,直接水冷的三维传动的工件台。整机从起动到刻蚀全过程具有手动控制和自控的功能,自动化程度较高。加上适当的部件后,并具备离子束镀膜,反应离子束刻蚀等多功能的条件。该设备经验收,评审鉴定,一致认为整机研制包括离子源、电源,结构和控制等都是成功的,技术性能全部达到或超过原设计指标。是一台国内领先的离子束刻蚀设备。

一、设计原理

LSK—3型离子束刻蚀机的设计原理是根据离子束刻蚀机的基本工作原理和加工器件的要求而确定的。图1是该机的结构原理图。

离子束刻蚀机的基本工作原理是利用离子束轰击固体表面的溅射现象来剥离加工几何图形的。该机在正常工作时,首先是待真空室压力抽至 1×10^{-3} Pa或更低时,可以调节氩气(工质)流量,使真空室压力保持在 $(1 \sim 3) \times 10^{-2}$ Pa(如果需用辅助气体,则可按一定比例与之混合),然后启动离子源各电源,使离子源正常工作。从离子源引出一定能量和密度的离子束,被中和器发射的电子中和(束变为中性)后来轰击工件进行溅射刻蚀(导体器件不加中和器)。工件表面必须预先制备沟槽的掩模图形,这样裸露部分被刻蚀掉,掩蔽部分被保留下来,从而在工件表面形成所需要的沟槽图形。

对于气体轴承,由于其材料如碳化硼、硬质合金、陶瓷和钛合金等的溅射率较低,螺旋槽宽而深(约数微米级),应用机械掩模。为了提高沟槽刻蚀深度的均匀性和适应各种形状(如平板形、圆柱形、圆锥形、半球形)气体轴承螺旋槽的加工,工件台应能转动,在垂直方位应能倾斜,与束垂直的水平方位应能平移一定的距离。为了保证刻蚀的气体轴承有良好的对称性,故工件台按 $\phi 100$ mm直径设计,有效束径按 $\phi 100$ mm设计,以便能至少同时刻蚀6片

止推板。除外，气体轴承的螺旋槽为等深度的，其槽深终点就可以根据其刻蚀速率和沟槽深度，采用定时器自动和手动控制快门开放时间来实现。

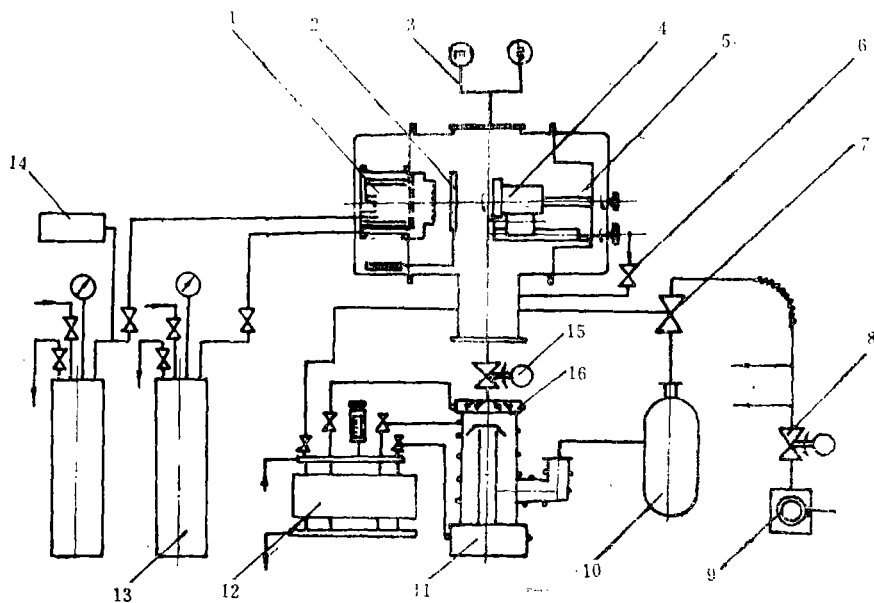


图1 结构原理图

- 1—离子源； 2—快门； 3—测量规管； 4—直接水冷工件台；
5—真空室； 6—电动放气阀； 7—手电两用三通阀； 8—真空阀；
9—2XZ-8型直联机械泵； 10—储气罐； 11—K-200T扩散泵；
12—水冷却系统； 13—Ar、O₂供气系统； 14—质量流量计；
15—高真空插板阀； 16—水冷障板

二、主要技术性能

1. 离子源性能

- (1) 离子束有效束径 $\phi 100\text{mm}$ ；
- (2) 能量：100~1300eV连续可调；
- (3) 束流密度：0~1.0mA/cm²连续可调；
- (4) 束流稳定性： $<\pm 1\%/h$ ；
- (5) 束流均匀性： $\leq \pm 5\%$ ；
- (6) 束能量稳定度性： $<\pm 3\%/h$ 。

2. 真空系统

- (1) 工作室(真空室)的极限真空： $7 \times 10^{-4}\text{Pa}$ ；
- (2) 工作压力： $(1 \sim 3) \times 10^{-2}\text{Pa}$ ；
- (3) 抽气时间：60min(从大气抽至 $3 \times 10^{-3}\text{Pa}$)；
- (4) 更换工件后抽气时间：30min(从大气抽至 $3 \times 10^{-3}\text{Pa}$)

3. 工件台

为旋转直接水冷工件台，转数5~30r/min连续可调；

倾斜角: $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ (不破坏真空连续可调);

平移距离: 150mm (不破坏真空连续可调)。

4. 工作室尺寸: $\phi 400 \times 475\text{mm}$

5. 供气系统: 可两路供气, 一路采用微调阀和质量流量计; 另一路采用一只微调阀。

6. 整机控制系统 (程序自动控制功能)

(1) 对刻蚀全过程14个受控量具有准确的控制功能;

(2) 对6个条件量具有判别、等级及分支处理功能;

(3) 延时时间精度优于 $\pm 0.2\%$ 。

7. 连续工作时间: 8h (开机械泵到关机械泵)。

三、设计方案的确 定

该设备的主机结构设计主要从保证总的技术性能要求、满足真空设备的基本要求、整机结构合理、工作可靠、操作方便等方面出发的。作为研制产品, 总体设计方案的确定主要考虑了4个问题:

1. 首先考虑的是设备化问题。3型机共分为两个机框集装 (即主机和电源框)。离子源快门安装在左大门上; 工件台安装在右大门上, 真空室由主机架支承真空系统、供气和水冷及电控系统。快门时间控制器、工件台驱动电源等集中装在主机机架中; 而离子源各电源及自控程序控制器则集装在立式机柜内, 以便集中操作和观察。

2. 考虑了一机多用的主机合理布局形式问题。该机采取卧式圆筒形真空室的布置。在真空室的上面设有盲法兰。离子源可以装在左大门上, 使它具有卧式刻蚀机的特点, 亦可以装在真空室上面 (去掉盲法兰), 使它具有立式刻蚀机的特点。同时, 真空室内留有安装平移工件台的法兰孔和安装支架, 去掉转动工件台, 装上平移工件台, 就为原来的LSK—2型机。若再加上适当的工件台和聚焦束的离子源, 即可实现离子束镀膜, 使得一机多用。

3. 考虑了手动、自动和自控相结合的控制方案。整机自动化是设备发展的方向, 该机从开机到刻蚀结束全过程能够实现程序自动控制, 亦可以手动。

4. 考虑了工作可靠、操作方便、维修容易的问题。水冷系统很重要, 停水或水量不足时, 配有断水警报器, 能及时发出警报。各执行部件的启动开关均有指示灯显示, 监视整机是否运转正常。复合真空计、供气系统的质量流量阀、微调阀、压力真空表、工件台驱动电源、快门时间控制器均安装在机柜正前面的长方形面板上, 高度为800mm, 而且面板有 5° 的倾斜, 便于工作人员坐在橙子上操作和观察, 机框上设有9个可拆开的大门, 便于维修。

四、真空系统的设计计算

真空是进行离子束刻蚀的必要条件, 它的性能好坏直接影响着整机性能。而良好的真空系统则取决于合理的真空系统的理论设计和计算。通过计算主要解决两个基本问题: 1. 根据该设备产生的气体量、极限真空、工作压力、抽气时间、选择主泵的类型、确定管道及选择真空元件。2. 计算本机抽气时间。

1. 确定设备产生的气体量, 很重要。该机的气体量 Q 主要有三个, 一是工作过程中放出的气体量 Q_1 ; 二是系统的漏气量 Q_2 , 三是真空室表面出气量 Q_3 。其中 Q_1 是主要的, 它来自离子源, 保证150mm离子源在最大束流密度时正常工作的气体流量大约是300等效毫安, 约

相当于 $8 \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$ 。经计算总的气体量 Q 为 $8.077 \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$ 。

2. 确定本机真空室中保持 $(1.3 \sim 2.6) \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 工作压力 (P_w) 所需要的真空系统的有效抽速 S 。

它的计算公式为: $S = Q/P_w (\text{L/s})$, 将 Q 、 P_w 值入后, $S = Q/P_w = 8.077/1.9 \times 10^{-2} = 415 \text{ L/s}$ 。

但为了可靠起见, 根据本机的具体情况, 需将 S 适当增大, 按增大 25% 计算, 实际要求的有效抽速 S 为 518.75 L/s 。

3. 根据要求的工作压力及使用要求, 选择油扩散泵作为主泵 (计算主泵的抽速)。

为了防止返油进入真空室, 扩散泵与真空室之间安装有单百叶窗障板, 障板比流导为 $4.8 \text{ L/s} \cdot \text{cm}^2$, 并配有一个 $\phi 200$ 高真空手电两用插板阀, 扩散泵前级泵选 2XZ 型真联机械泵组成真空机组。

(1) 根据要求, 所需的有效抽速 $S = 518.75 \text{ L/s}$ 考虑到加上障板、插板阀后的泵的抽速损失 (一般泵的有效抽速是泵的抽速 $\frac{1}{3}$ 左右), 暂选抽速为 $1200 \sim 1600 \text{ L/s}$ 的油扩散泵来进行试算: 选用 K-200 型扩散泵完全可以满足要求。泵的进口直径为 200 mm , 排气口直径为 65 mm 。

(2) 计算扩散泵与真空室排气口管道的流导, 验证选 K-200 型扩散泵是否合适。

总的流导 C 由高真空管道流导 C_1 、障板流导 C_2 、插板阀流导 (因该阀工作时全部打开, 故忽略它的流导不计) 串联组成。

确定气体沿管道的流动状态。真空室工作压力, $P_w = (1 \sim 3) \times 10^{-2} \text{ Pa}$, 扩散泵入口压力很低, 故管道出口压力可以忽略, 管道中的平均压力 $P' = P_w/2 = (0.6 \sim 1.5) \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 。此时 $P'd = (0.6 \sim 1.5) \times 10^{-2} \times 20 = (1.2 \sim 2) \times 10^{-1} < 2 \text{ Pa} \cdot \text{cm}$, 可见为分子流。

a. 高真空管道的流导, 由公式可得

$$C_1 = 11.6 A \alpha = 1894 \text{ (L/s)} \quad (\alpha \text{ 为克劳率值, 查得 } \alpha = 0.52 A \text{ 为管截面})$$

b. 障板的流导, 由真空设计手册 (上册) 的 (2-52) 式得:

$$C_2 = 1700 \text{ (L/s)}$$

c. 总流导 C , 由串联流导公式求得: $C = 900 \text{ L/s}$

d. 计算油扩散泵的抽速 S_p

$$S_p = \frac{S \cdot C}{C - S} = 1225 \text{ (L/s)}$$

由此可见, 选择 K-200 型扩散泵是合适的。此泵在 $10^{-2} \sim 10^{-4} \text{ Pa}$ 范围内的平均抽速为 $1200 \sim 1600 \text{ L/s}$ 。极限真空度 $P_0 = 7 \times 10^{-5} \text{ Pa}$, 能满足本机真空系统 $7 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 的极限真空度要求。而且, 该泵的最佳工作压力为 $1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-4} \text{ Pa}$, 能满足本机工作压力 P_w 为 $(1 \sim 3) \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 的要求。

4. 泵配计算。选配前级泵的原则是要求前级泵造成主泵 (即扩散泵) 工作所需要的预真空条件和在主泵允许的最大排气压力 (这里指扩散泵的最大前级耐压一反压力) 下前级泵必须能将主泵所排出的最大气体量及时排走。即前级泵的有效抽速必须满足下列条件:

$$S_g > \frac{P_w S}{P_n} \text{ 或 } \frac{Q_{max}}{P_n}$$

式中, S_g 为前级泵的有效抽速 (L/s), 和选择高真空泵一样, 先由 S_g 来确定前级泵的抽速, 然后再根据该抽速选定泵型。 P_n 为主泵前级的最大反压力 (Pa); Q_{max} 为主泵所能排出的最大气体量 (Pa·L/s); P_w 为主泵允许的最高工作压力 (Pa); S 为主泵工作在 P_g 时的有效抽速 (L/s)。

(1) 前级泵有效抽速的计算

主泵为K—200型扩散泵, 它的最大反压力 $P_n = 40 \text{ Pa}$; 由抽速曲线可知, 在 $P_w = 3 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 压力下扩散泵的最大排气量 $Q_{max} = 3 \times 10^{-2} \times 1200 = 36 \text{ (Pa·L/s)}$ 在扩散泵出口管道断面处, 要求前级泵的抽速不小于:

$$S_p = \frac{Q_{max}}{P_n} = 0.78 \text{ (L/S)}$$

取 S_p 为 0.8 L/s 。

(2) 前级管道流导计算

扩散泵排气口的直径为 65 mm , 经过储气罐、三通真空阀, 与前级管道相连, 前级管道的直径为 32 mm , 长度为 1 m 。由于管道长暂不考虑弯角的影响。

确定气体流动状态: 扩散泵出口压力为 40 Pa , 机械泵进气口压力要比 40 Pa 低得多, 在计算管道中平均压力时可以忽略, 故 $P' = P_n/2 = 20 \text{ Pa}$ 。此时 $P'd = 20 \times 3.2 = 64 > 2 \text{ (Pa·cm)}$, 所以该管道的气体流动状态为粘滞流。

前级管道的流导公式为:

$$C_n = 1.34 \times 10^3 \frac{d^4}{L} \cdot P' = 28.1 \text{ (L/s)}$$

(3) 前级泵的抽速计算

前级泵的抽速公式为:

$$S_p = \frac{S_g \cdot C_n}{C_n - S_g} = 0.823 \text{ (L/s)}$$

由于前级泵为机械泵, 它的抽速是在大气压力下测得的, 但正常使用的泵都是在低于大气压的条件下运转, 使泵的抽速下降了, 故必须根据抽速曲线来选择泵。在没有抽速曲线时, 可参考下面经验公式: $S_p = (1.5 \sim 3) S'_p$ 。式中, S_p 为实际选用的机械泵抽速。

通常把 S_p 增大 $1.5 \sim 3$ 倍后选择泵。若增大 3 倍, 则 $S_p = 2.469 \text{ L/s}$ 。现选 2 XZ—8 型直联式机械泵, $S_p = 8 \text{ L/s}$ 完全满足需要。

5. 计算抽气时间

不考虑管道的容积, 真空室容积为 $V = 88 \text{ L}$, 工作压力为 $P_w = (1 \sim 3) \times 10^{-2} \text{ Pa}$, 用 2 XZ—8 型机械泵从大气抽到 13 Pa , 其抽速 $S_p = 8 \text{ L/s}$ (因为管道流导大, 故管道对抽速的影响可以忽略), 由公式得: $t = 2.3 K_g \frac{V}{S_p} \cdot \lg \frac{P_i}{P}$ 式中, K_g 为修正系数, 为 2 ; P_i 为起始压力通常取 $1 \times 10^5 \text{ Pa}$; P 为终止压力取 13 Pa ; 代入公式得: $t = 3.26 \text{ min}$ 。

一般粗抽时间不大于 $10 \sim 30 \text{ min}$ 而计算时间为 3.26 min , 实际上, 开机械泵 4 min 真空度达 4 Pa 故从抽气时间角度来看, 选择 2 XZ—8 型直联式机械泵做为前级泵是合理的。

计算从 13 Pa 到 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 的抽气时间, 主要考虑了出气的影响。 1 h 后, 真空室的出气量经计算 $Q = 203 \times 10^{-3} \text{ (Pa·L/s)}$ 不锈钢 1 h 的单位面积出气速率为 $2 \times 10^{-5} \text{ (Pa·L/s)}$, 真空室内表面积为 9027 cm^2 。此时, 工作压力 $P_o = 0.39 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 小于 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 。可见高真

空 1×10^{-3} Pa 只需 1 h 就能达到。设计指标抽到 3×10^{-3} Pa 为 1 h, 而实际抽速 3×10^{-3} Pa 只需要 27~42 min, 连续抽气 2 h, 极限真空度可达 4×10^{-4} Pa, 验证了真空系统的设计是合理的。

6. 储气罐的设计计算

本机真空系统中, 在扩散泵出口与三通真空阀之间设有储气罐。主要作用是为了缩短工作周期, 储存扩散泵排出的气体。本机在工作过程中, 更换样品要求在不关闭扩散泵加热器的情况下, 真空室放进大气换取工件。装好工件后, 用机械泵通过三通阀预抽真空室, 这段时间内将利用储气罐来维持扩散泵工作。

储气罐体积计算公式

$$V \geq \frac{Q \cdot t}{P_1' - P_0'}$$

式中, Q 为扩散泵上面插板阀关闭后储气罐的气体负荷 (漏气及出气)。暂取 $Q = 1 \times 10^{-1}$ Pa · L/s, t 为机械泵预抽真空室时间, 取 $t = 1800$ s; P_1' 为扩散泵最大反压力, 取 $P_1' = 40$ Pa, P_0' 为机械泵工作时扩散泵的前级压力, 取 $P_0' = 7 \times 10^{-1}$ Pa 代入公式得 $V = 5.94$ L

现根据结构, $V = 7.7$ L, 实际预抽时间为 10 min。为此, 储气罐体积是足够用。

五、结构特点

1. 真空室的结构设计比 1 型、2 型、2 A 型机作了较大的改动, 使之结构新颖、合理, 具有卧式和立式离子束刻蚀机的特点。离子源改在左大门上, 不放在真空室内, 克服了原 1 型机离子源长期工作使真空室温度增高的问题。工件台安装在右大门上, 便于装取样品, 避免了原 1 型机安装工件不方便的不足。除外, 正如设计方案确定时所述, 具有一机多用, 多功能的特点。

2. 改间接水冷转动工件台为直接水冷转动工件台, 并且在刻蚀的过程中, 在真空的条件下, 通过转动手轮可以改变距离和倾斜角度。直接水冷降低了工件台靶面的温度, 可以提高器件的加工刻蚀质量。现在设计的直接水冷工件台靶面直径为 100 mm, 三个自由度, 旋转由力矩电机通过齿轮来实现, 转速从 5~30 r/min 连续可调, 正反均可。倾斜角度, 与束垂直的水平方位是 $0^\circ \pm 90^\circ$, 是通过蜗轮蜗杆实现的。平移距离 150 mm, 是通过转动丝杆实现的, 直接水冷是通过空心的轴和碗形橡胶密封圈实现的。结构原理图如图 2 所示。

3. 改变了快门结构, 原 1 型机的快门是采用电磁铁驱动的三叶渐开式结构。安放在真空室内的离子源前面, 电磁线圈过热失效在工作时无法补救。现改为电磁铁驱动真空室的四杆联动的单叶片结构, 将电磁线圈等驱动结构移到真空室外边来, 可以电动, 也可以手动。

单叶片为 $\phi 110$ mm, 固定在空心连杆上。连杆与传动轴相连, 传动轴通过高真空威尔逊密封跟位于真空室外的连轴、滑杆相连。滑杆在电磁线圈内套里, 通过改变电磁线圈中的电流方向, 使滑杆左右移动, 从而带动连轴、传动轴连杆联动, 单叶片摆动。电磁铁可使滑杆移动距离为 40 mm, 电磁线丝的直径为 0.54 mm 共 2800 匝 (电阻 20 Ω), 威尔逊密封的润滑油用 DC-274 扩散泵油。结构原理图如图 3 所示。

4. 供气系统采取了手动的微调阀和质量流量阀两路供气系统。使供气更为稳定可靠。同时, 改进了氩、氧气储罐的结构, 利用真空隔膜阀代替了原手动截止阀, 克服了过去隔离阀

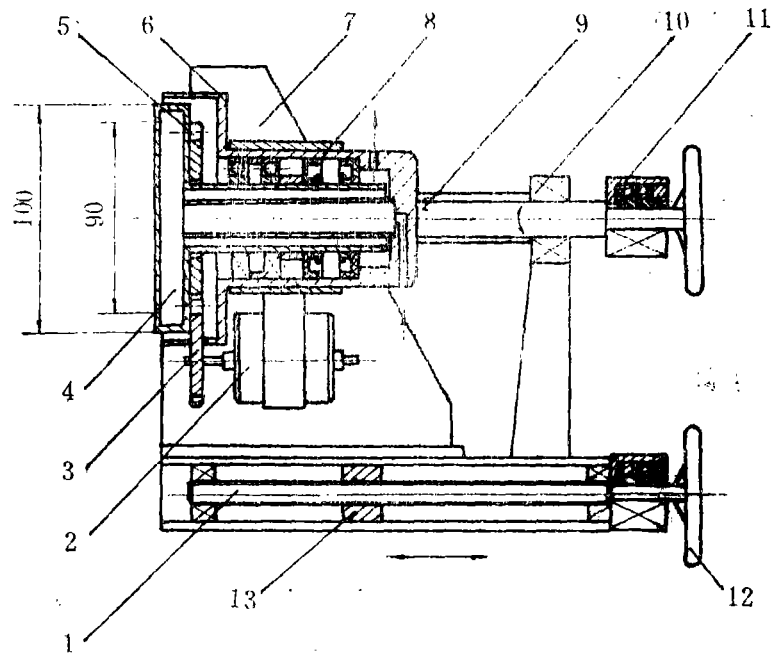


图2 三维直接水冷工件台结构原理图

- 1—移动丝杆； 2—步进电机； 3—小齿轮； 4—工件台；
 5—大齿轮； 6—外套； 7—支架； 8—碗形密封； 9—倾斜机构；
 10—支架； 11—威尔逊密封； 12—手轮； 13—螺母。

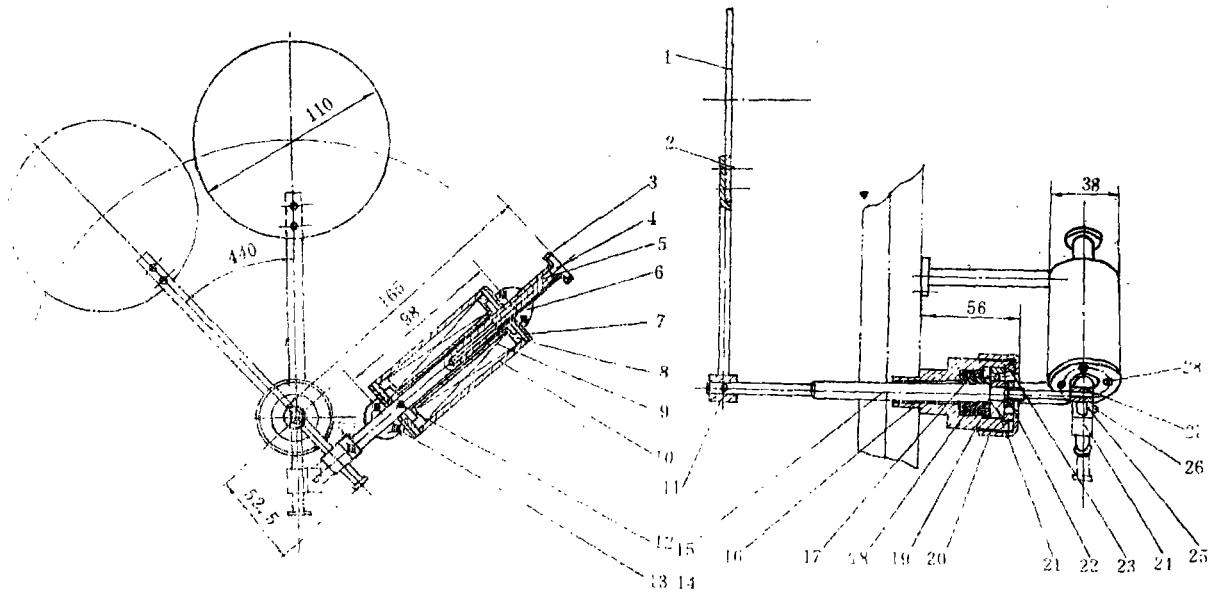


图3 手电两用四杆联动单叶片快门

- 1—挡片； 2—螺钉M4×8； 3—滑杆； 4—堵头； 5—磁棒； 6—支架； 7—端盖；
 8—骨架； 9—线圈； 10—外套； 11—拨杆； 12—销轴； 13—螺钉M3×7； 14—垫圈；
 15—转动轴； 16—密封套； 17—密封圈； 18—垫圈； 19—垫圈； 20—压紧螺母M42×1；
 21—滚动轴承； 22—内压圈； 23—外压圈； 24—连接滑杆； 25—连接滑块；
 26—螺钉3×14； 27—轴套； 28—螺钉M3×10

使橡胶管松了漏气紧了将橡皮压坏的现象,充气方便、可靠。

5.改进完善了真空系统。真空是进行离子束刻蚀的必要条件,它的性能好坏直接影响着整机性能。过去的1、2型机三通阀、插板阀、放气阀都是手动的。该机将放气阀改为电动放气阀,将手动插板阀和三通阀改为手电两用阀。用CRZ-1T型自控复合真空计代替了不能自控的GS-3型复合真空计。用K-200T凸腔油扩散泵代替了K-200型直腔扩散泵。使得真空系统抽气快、极限真空度高(4×10^{-4} Pa),为整机自动化打下了基础。

6.整机具有自控的功能,自动化程度较高。该机能够按自控程序框图进行运转,从启动到刻蚀终止全过程能全部自动化。

六、发展前景

1.一机多用(即多功能)是离子束刻蚀机发展的方向。从国内外离子束刻蚀设备按离子源安装位置来分,可分为卧式(离子束与工件台中心线位于一条水平线)和立式(离子束与工件台中心线位于一条垂直线上)两类,各有优缺点。该机的设计是卧式和立式相结合,具有卧立式离子束刻蚀机的特点。原来的LSK-1型机是以刻蚀动压气体轴承螺旋槽为主,LSK-2型机是以刻蚀声表面波器件沟槽栅,特别是深度加权沟槽栅的专用设备。该机在结构设计时,除安装直接水冷转动工件台外,还在真空室备有安装平移工件台的法兰孔和安装支架,若卸下转动工件台,装上平移工件台,就为原2型机。当前以刻蚀,抛光,减薄,清洗固体器件为主,真空室的物理方案是考虑了离子束镀膜(亦称离子束喷涂)的问题,只要加上适当的工件台和聚焦束的离子源,即可以实现离子束镀膜,使得一机多用。

2.反应离子束刻蚀亦是当前离子束刻蚀机发展的方向。该机已考虑了这方面的问题。水冷障板设计了通水和通氟里昂冷却的两路系统,供气系统有两路,其中一路可以通活性气体。若将现有的考夫曼离子源的阴极改为冷阴极,即可以实现反应离子束刻蚀的问题。

3.整机自动化是以后设备发展的方向。

4.由于动压气体轴承螺旋槽的刻蚀深度深,整机工作时间都在8h以上,故也暴露出一些需要改进的问题,主要是转动工件台的力矩电机放在真空室内不合适,应放在真空室外。现在的直接水冷转动工件台对加工气体轴承(止推板是合适的,但对加工轴套不太合适(一次刻蚀的数量少),需改进。

参考文献

- 1 《真空设计手册》编写组。真空设计手册(上册)。北京:国防工业出版社,1979;
- 2 达道安主编。真空设计手册(修订版)。北京:国防工业出版社,1991;1
- 3 谈治信。离子束加工和离子镀膜简介。航空工艺,1987;3:35~38