

# 精密平面磨床热变形的研究\*

张伯霖 庄有土 崔德昌

(精密机械工程系)

## 提 要

本文分析了MM7120A型精密平面磨床的热源、温度场、热变形及其试验结果,论述了热变形对平面磨削精度的影响,提出了改善平面磨床热态特性的建议。文中还就我国现行机床热变形试验中关于“热平衡”的标准问题提出了新的看法。

高精度高光洁度的平面磨削,是机械制造中的一项关键技术。现代精密加工要求平面的磨削精度达到1~5微米/米,光洁度 $\nabla 10 \sim \nabla 14$ 。国内外的生产实践已经证明,在精密加工中,由于热变形引起的制造误差,占总的制造误差的一半以上。机床和工艺系统的热变形,已经成为实现高精度平面磨削的主要障碍之一。

为了实现上述工艺目标,目前国内外“精密级”以上的平面磨床,大多数都采用卧轴矩台、周边磨削的结构和工作方式,MM7120A和MG7120型平面磨床就是其中的典型代表。该机床工作台工作面积 $200 \times 630$ 毫米,磨削的纵向运动和横向运动均由十字形工作台完成,砂轮主轴只随磨头部件在立柱导轨上作垂直进给,砂轮主轴采用双速装入式电动机直接同轴驱动,转速为1500/3000转/分,功率为2.1/2.8瓩。磨头的前后径向轴承和止推轴承,都是小孔节流的静压轴承。静压系统采用独立油箱,与主机分离。工作台纵向往复运动由叶片式可逆变量泵液压装置驱动,並以机床床身下部作为液压系统的油池。

机床上的热源有两类:即内部热源和外部热源。内部热源主要与机床的设计制造有关,它造成的影响由机床制造厂负责;外部热源与机床的使用有关,主要由用户负责。为了研究内部热源对机床热态特性的影响,试验是在 $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 的恒温室中进行的,以排除外部热源的干扰。

MM7120A型平面磨床是一台精密机床,主要用作中小型零件的精密平面加工,磨削用量很小,加工时产生的磨削热不大,加之有冷却液将它及时带走,因此仍可用“空运转试验法”来寻找和研究机床内部的主要热源。在该机床的热变形试验中,我们一共布置了132个温度测点和37个位移测点(见图8)。

\* 参加试验工作有陈南玉、黄燕青、林强、张丽娟、梁发生、陈友仁等同志。

本文1984年9月22日收到。

## 测 试 手 段 的 建 立

### 1. 温度测试

机床在热态下各部温度一般都低于 100℃, 采用“铜——康铜”热电偶作为感温元件较为适宜。因为在常温范围内, 这种热电偶具有线性好、热电势率高(约为 40 微伏/℃)、制作简单、成本低廉以及便于进行多点巡回检测等优点。

热电偶的标定, 是用测量精度为 0.1 微伏的 UJ26 型低电势直流电位差计和 AC15/5 型直流复射式检流计进行的(图 1)。

为了提高热电偶多点标定工作中的精度和效率, 采用了 CROMEMCO 型微型计算机进行数据处理:

某根热电偶的热电势率

$$\psi = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{V_i - V_{i-1}}{T_i - T_{i-1}}}{n}$$

式中  $V_i$ —第  $i$  次测温时的热电势值( $\mu V$ )

$T_i$ —第  $i$  次测温时的温度值(℃)

则热电偶某热电势值所对应的温度:

$$T = \frac{V}{\psi}$$

这种方法主要优点是能获得一个统一的标定方法, 减少人为因素对标定精度的影响。

上述 132 点机床温度场, 我们用 PF15 型多路直流数字电压表和 LY4(或 LY6)型数字打印机, 进行快速自动巡回检测和打印记录, 仪器的测温精度为 0.1℃。

由于试验对象是一台新的精密机床, 不允许敲掉机床表面的油漆层, 热电偶只能贴附在油漆表面上, 而没有和金属表面直接接触, 这样就会给机床表面温度场的测试带来误差。为了定量地测出这项误差的大小, 我们在该机床立柱右侧面安装照明灯架的部位(卸下灯架), 局部敲掉油漆层, 将一根热电偶直接敷设在用砂纸打光的立柱金属表面上。同时, 沿着立柱温度场等温线的方向, 在附近另找一点, 隔着油漆层敷设另一根热电偶(图 2)。多次实测

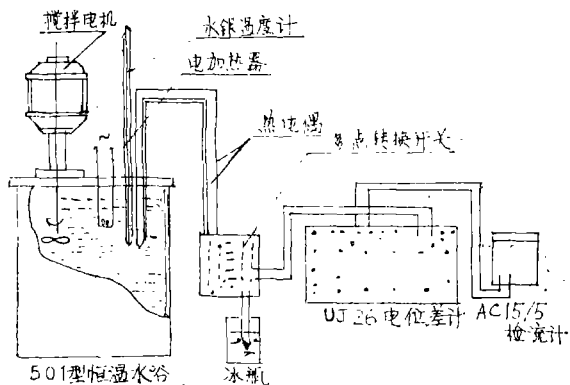


图 1 热电偶的标定系统

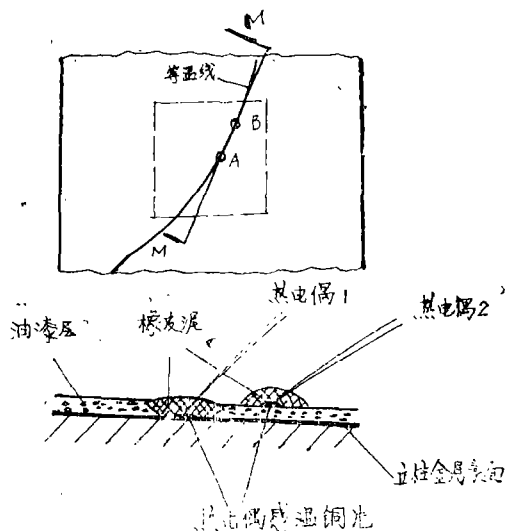


图 2 油漆层对热电偶测温的影响

表明,两者的温度差值仅为 $0.1\sim 0.2^{\circ}\text{C}$ (相对误差 $0.5\%$ )。

这表明油漆层对热电偶测温精度的影响并不大。这和某些苏联学者所得出的结论大不相同,显然苏联学者大大夸大了油漆层的影响。

## 2. 位移测试

平面磨床在工作过程中,砂轮主轴轴线相对于工作台的热位移,对平面磨削精度影响很大,必须精确地加以测定。其相对的线位移用杠杆千分表测量,工作台的角位移用合象水平仪测量。

但是,仅仅测量这个相对热位移是不够的,因为它只是机床各部件热变形的综合反映。为了分析产生这个热变形的原因,分解出机床各部件热变形对这个综合热变形的“贡献”,必须测出各部件的绝对热位移。为此,我们脱离机床本体,在地基上直接搭起一个刚性支架,建立了一个绝对坐标系。该支架四个主要的垂直支柱下部各装有一个125公斤的阶梯圆柱形重铁,每个重铁以底部三个可调螺钉直接和水磨石地面接触。在刚架的适当部位,用钢筋表杆安装千分表或位移传感器,来对机床各部件热位移进行绝对测量。

机床不动部件(如立柱、床身等)的热位移,用杠杆千分表或扭簧比较仪进行接触式测量;砂轮主轴在运转中轴线的热位移,以及工作台台面的热变形,则用电涡流传感器及相应的二次仪表在机床动态下进行非接触测量。图3是四个电涡流传感器测量磨头主轴轴线热位移的情况。

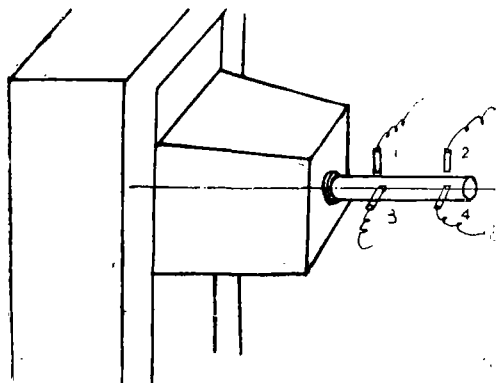


图3 用电涡流传感器测量主轴轴线热位移

从机床的冷态开始,每次热变形试验一般都要持续好几个小时,机床才能达到热平衡。在这样长时间的试验过程中,保持位移测量基准(刚性支架)本身固定不动,这并不是一件容易办到的事。为监视刚性支架的自身变形情况,我们在每根垂直支柱的上、中、下三个位置上都有测温布点。实测表明,每次试验全过程刚架上各点的温度变化都小于 $0.3^{\circ}\text{C}$ 。其次,在刚性支架的任两根水平钢管之间安装扭簧比较仪,测得在整个试验过程中,钢管之间的相对位移都小于 $0.25$ 微米。此外,我们注意到,每次热变形试验后的次日,当机床完全恢复到冷态( $20^{\circ}\text{C}$ )后,刚架上的各个杠杆千分表几乎都能自动回零。从以上三方面可证实,我们的绝对位移测量基准是可以信赖的。

## 试 验 方 法

为了全面摸清机床的温升、温度场和各部件状况,研究热变形对磨削精度的影响,找出机床热刚度的薄弱环节,进而采取有效的热变形对策,我们对MM7120A型精密平面磨床主要进行了以下几项试验:

### 1. 空运转综合试验

这项试验的目的在于全面考察各个内部热源对机床温升、温度场、热变形的影响和达到热平衡的时间。

## 2. 分离热源试验

机床往往是一个多热源系统, 各个热源在机床上产生的热变形, 可以看作是其中每一个热源单独作用时所产生热变形的某种迭加值。这一点也可由线性微分方程的迭加原理得到说明。因此, 可用孤立因素法分别研究机床的各个热源, 计算或试验由单个热源所引起热变形, 再通过综合分析, 便可找出对加工精度影响最大的主要热源。

## 3. 磨削试验

这项试验的目的, 是考核磨削热和冷却液对机床温度场和热变形的影响。

### 关于“机床达到热平衡的标准”问题的讨论

机床的升温 and 降温是一个比较缓慢的过程。如图 4 所示, 机床开动以后, 温度不断上升, 经过一段时间后, 某点的温升  $T$  将逐渐趋于一个稳定值  $T_B$ , 此后机床虽然继续在开动, 但温升将不再增加。也就是说, 此时传入该点的热量和由该点散发出来的热量相等。如果机床上各点的温度都达到某稳定值, 那么我们就说, 机床达到了“热平衡”。

用回归分析方法处理大量的实验数据, 可得到“温升  $T$ —时间  $t$ ”的近似关系式:

升温时

$$T = T_B (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) \quad (1)$$

降温时

$$T = T_B e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (2)$$

式中  $T_B$ ——稳定下的理论温升值

$\tau_1, \tau_2$ ——升温 and 降温的时间常数,  $[\tau_2 > \tau_1]$

从理论上讲, 机床要达到完全的热平衡, 需要无限长的时间。在工程实际上, 一般认为只要  $T = 0.95T_B$  时, 就算达到热平衡了。

代入式 (1) 得:

$$0.95T_B = T_B (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) \quad (3)$$

$$\therefore t \approx 3\tau_1$$

将式 (1) 对时间  $t$  求导数

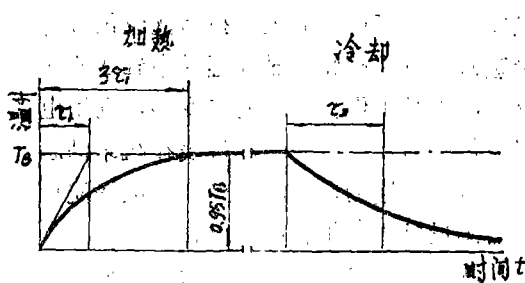


图 4 机床的升温与降温曲线

$$\frac{dT}{dt} = -T_B e^{-\frac{t}{\tau_1}} \cdot \left(-\frac{1}{\tau_1}\right) = \frac{T_B}{\tau_1} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (4)$$

当  $t = 3\tau_1$  时

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_B}{20\tau_1} \quad (^\circ\text{C}/\text{小时}) \quad (5)$$

即达到热平衡时的温升变化率既和机床最大温升值有关, 又和升温时间常数  $\tau_1$  之值有关。前者主要取决于机床主轴的转速, 后者主要取决于机床的热容量和换热系数。热容量越大,  $\tau_1$  之值也越大。

以中小型机床为例, 假设到达平衡的时间是 3 小时, 即  $\tau_1 = 1$  (小时), 那么当机床主轴轴承最大温升值  $T_B = 10, 20, 30, 40^\circ\text{C}$  时, 按式 (5) 可算出热平衡时的温升变化率 (见表 1)。

由表可见, 若机床主轴轴承的最大温升值为  $40^\circ\text{C}$ , 则只有当温升变化率每小时不大于  $2^\circ\text{C}$  时, 机床才算达到热平衡, 余类推。

但在 JB2278—78 部颁标准中, 却不分机床的热容量大小和主轴轴承最大温升值的大小, 笼统地规定每小时温升不超过  $5^\circ\text{C}$  时, 机床就达到热平衡。我们认为, 这条规定是不恰当的和科学的, 以中小型机床 (设  $\tau_1 = 1$  小时) 为例,

当  $\frac{dT}{dt} = 5^\circ\text{C}/\text{小时}$ , 由式 (4)

$$e^{-\frac{t}{\tau_1}} = \frac{\tau_1}{T_B} \cdot \frac{dT}{dt} = \frac{1}{40} \times 5 = 0.125$$

$$\therefore t = 2.526$$

代入式 (1),

$$T = T_B (1 - e^{-2.526}) = 0.875 T_B$$

也就是说, 当  $\frac{dT}{dt} = 5^\circ\text{C}/\text{小时}$ , 此时主轴轴承温升只达到其最大温升值的 87.5%。

如果以这条标准用在 MM7120A 平磨上, 当  $\frac{dT}{dt} = 5^\circ\text{C}/\text{小时}$ , 该机床开车后 75 分钟就算达到热平衡 (见图 5), 而实际上此时机床各部分还在急剧地温升和热变形, 远远未达到热平衡状态。

因此, 我们建议今后在机床的温升热变形试验中, 重新规定机床达到热平衡的标准。对于中小型机床 (设  $\tau_1 = 1$  小时), 有两组数据可供选择 (表 2)。

在机床试验中, 应该根据机床的热容量和换热系数 (时间常数  $\tau_1$ ) 和最大温升值的大小, 来确定达到热平衡状态的标准。显然, 过去规定  $5^\circ\text{C}/\text{小时}$  的标准是太宽了。

为了既使机床基本上达到热平衡状态, 又节约试验时间, 我们建议按第 II 算式来确定达

表 1  $\tau_1 = 1$  (小时)

$T_B (^\circ\text{C})$	40	30	20	10
$\frac{dT}{dt} (^\circ\text{C}/\text{小时})$	2	1.5	1	0.5

表 2 当  $\tau_1 = 1$  小时

$\frac{dT}{dt} (^\circ\text{C}/\text{小时})$ / 最大温升		40 $^\circ\text{C}$	30 $^\circ\text{C}$	20 $^\circ\text{C}$	10 $^\circ\text{C}$
算式					
I	$T = 0.95 T_B$	2	1.5	1	0.5
II	$T = 0.90 T_B$	4	3	2	1

到热平衡时的温升变化率  $\frac{dT}{dt}$ , 当  $\tau_1 = 1$  小时

对  $T_B = 30 \sim 40^\circ\text{C}$  (普通机床)  $\frac{dT}{dt} = 3 \sim 4^\circ\text{C}/\text{小时}$

$T_B = 10 \sim 20^\circ\text{C}$  (精密机床)  $\frac{dT}{dt} = 1 \sim 2^\circ\text{C}/\text{小时}$

按照上述建议, MM7120A 型平面磨床全机开动 ( $n = 1500$  转/分) 时, 机床达到热平衡的时间为 4 个小时 (图 5)。

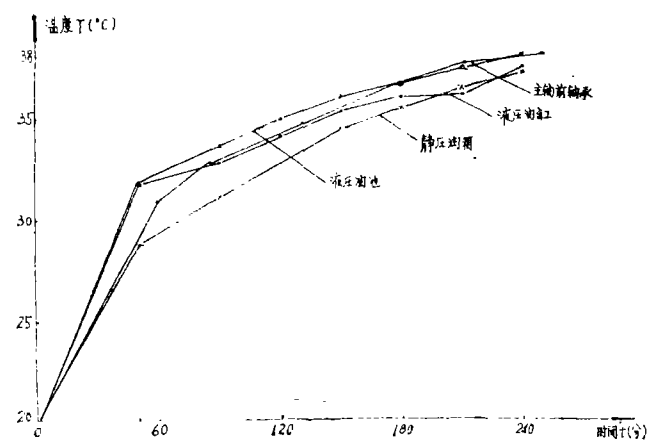


图5 MM7120A 的空运转温升曲线

图 5 为 MM7120A 精密平面磨床在常用运动参数下机床空运转时的温升曲线。由图可见, 在热平衡状态下, 磨头前轴承温升为  $17.7^\circ\text{C}$ , 静压油箱油温的温升为  $17.2^\circ\text{C}$ , 液压油池的油温升为  $17.7^\circ\text{C}$ , 油缸温升为  $17.2^\circ\text{C}$ 。

图 6 和图 7 是在上述试验条件下, 机床上几个主要测点的“热位移——时间”关系曲线。

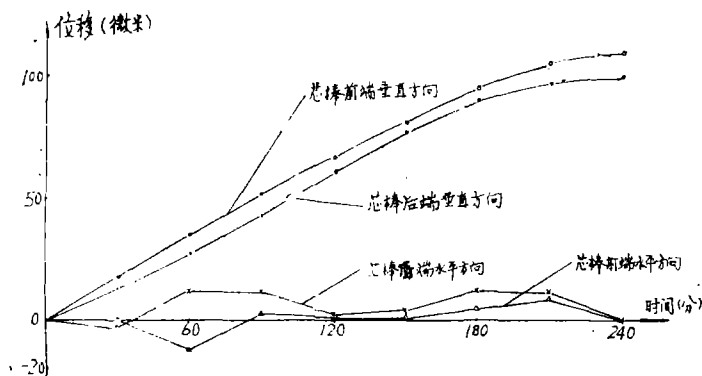


图6 砂轮主轴芯棒的热位移

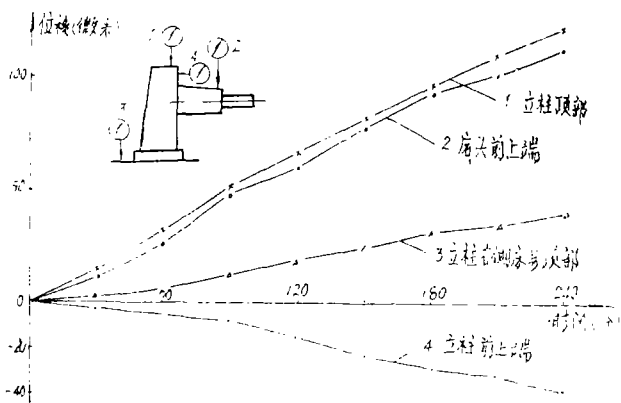


图7 立柱和磨头的热位移

整机温度分布和热变形分析

图 8 为 MM7120A 型平面磨床全机空运转 4 小时后机床温度场的测试结果，由图可见：

1. 床身温度分布比较均匀

床身的平均温升为 5.2℃，前面比后面的平均温差仅高 0.7℃。机床工作台在床身部件热变形影响下，有向立柱倾斜的变形趋势，但倾斜量很小。总的说来，床身可近似地看成均匀膨胀。床身顶面向上的热位移可按下式计算：

$$\Delta Z_{\text{床身}} = \alpha \cdot H_1 \cdot \Delta t$$

式中

$\alpha$ ——床身材料的线膨胀系数，铸铁的  $\alpha = 10 \times 10^{-6}$

$H_1$ ——床身的高度， $H_1 = 750$  毫米

$\Delta t$ ——床身部件的平均温升， $\Delta t = 5.2^\circ\text{C}$

$$\Delta Z_{\text{床身}} = 10 \times 10^{-6} \times 750 \times 1000 \times 5.2 = 39 \text{ (微米)}$$

这个数值和实测值（40μ）极为接近。

2. 磨头是机床上发热最严重的部件

主轴前后轴承的温升高达 17.7℃，整个磨头部件的平均温升为 14.2℃，且下部平均温升比上部高 2.3℃。

图 9 表明磨头在立柱上的安装位置，由于磨头悬伸在立柱正面上，有如一个悬臂梁，其上下两面可以自由膨胀，而左面（悬臂的根部）则受到立柱垂直导轨的约束。因此，在上述温度场的作用下，磨头除了作整体膨胀以外，还将产生向上的翘曲变形。

综合考虑这两种变形（线膨胀和热弯曲），

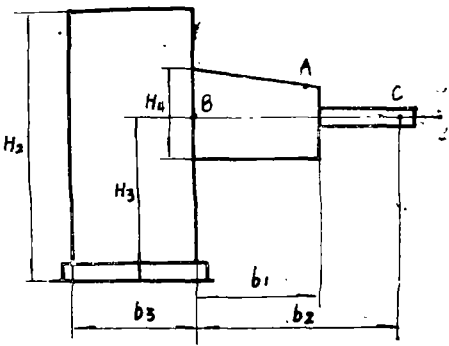


图 9 磨头在立柱上的安装位置





磨头上面前端  $A$  点(图 9)相对于立柱  $B$  点的垂直热位移:

$$\Delta Z_A' = \alpha \cdot \frac{H_4}{2} \cdot \Delta t_{\text{磨头}} + b_1 \varphi_1$$

式中

$H_4$ ——磨头的高度,  $H_4 = 200$  毫米

$\Delta t_{\text{磨头}}$ ——磨头部件上半部的平均温升,  $\Delta t_{\text{磨头}} = 14.2^\circ\text{C}$

$b_1$ ——磨头的外伸长度,  $b_1 = 350$  毫米

$\varphi_1$ ——磨头受热后向上的倾斜角, 弧度

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= -\frac{\alpha \cdot b_1}{H_4} (\Delta t_{\text{底}} - \Delta t_{\text{顶}})_{\text{磨头}} \\ &= \frac{10 \times 10^{-6} \times 350 \times 1000}{200 \times 1000} \times 2.3 = 4 \times 10^{-5} \text{ (弧度)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \Delta Z_A' &= 10 \times 10^{-6} \times \frac{200}{2} \times 1000 \times 14.2 + 350 \times 1000 \times 4 \times 10^{-5} \\ &= 28.2 \text{ (微米)} \end{aligned}$$

### 3. 立柱是对热变形最敏感的部件

磨头的发热通过热传导向立柱单向传递, 立柱内的磨头电动机(后部带风扇)也会通过传导、对流和辐射等方式向立柱传热, 形成了不均匀的立柱温度场。由图 8 可见, 立柱前面温升高, 背面温降低; 上部和中部温升高, 下部温降低。这样就使立柱在向上热膨胀的同时, 产生向后的热弯曲。

磨头是安装在立柱中部的, 立柱的上抬和后倾, 必然会影响磨头上各点的热位移。

立柱在  $B$  点(图 9)的向上膨胀量

$$\Delta Z_B' = \alpha \cdot H_3 \cdot \Delta t = 10 \times 10^{-6} \times 500 \times 1000 \times 6.4 = 32 \text{ (微米)}$$

立柱在  $B$  点的向后倾斜角

$$\varphi_B = \frac{\alpha \cdot H_3}{b_3} (\Delta t_2 - \Delta t_1)_{\text{立柱}}$$

式中

$(\Delta t_2 - \Delta t_1)_{\text{立柱}}$  为立柱前后两面的平均温差,

$(\Delta t_2 - \Delta t_1)_{\text{立柱}} = 1.8^\circ\text{C}$

$$\varphi_B = \frac{10 \times 10^{-6} \times 500 \times 1000}{350 \times 1000} \times 1.8 = 2.5 \times 10^{-5} \text{ (弧度)}$$

则磨头顶部  $A$  点的垂直绝对热位移:

$$\begin{aligned} \Delta Z_A &= \Delta Z_{\text{床身}} + \Delta Z_B' + b_1 \varphi_B + \Delta Z_A' \\ &= 39 + 32 + 350 \times 1000 \times 2.5 \times 10^{-5} + 28.4 = 108 \text{ (微米)} \end{aligned}$$

这和实测值 ( $112\mu$ ) 也很接近。

磨头主轴心棒外端 ( $C$  点) 的垂直绝对热位移:

$$\begin{aligned} \Delta Z_C &= \Delta Z_{\text{床身}} + \Delta Z_B' + (\varphi_1 + \varphi_B) b_2 \\ &= 39 + 32 + (4 + 2.5) \times 10^{-5} \times 600 \times 1000 \\ &= 39 + 32 + 39.1 = 110.1 \text{ (微米)} \end{aligned}$$

这和实测值 ( $112\mu$ ) 颇为接近。

由此可见, 砂轮主轴轴线的上抬量高于工作台的上抬量 ( $40\mu$ )。因此在整个升温过程中, 砂轮有逐渐脱离被加工表面的趋势, 最大的相对位移量达  $(112 - 40) \approx 72$  微米。这个热变化对机床的几何精度虽然没有什么影响, 但对平面磨削尺寸精度, 尤其对镜面磨削质量有很大的影响。

根据机床上各点热位移的测试结果, 可以画出 MM7120A 型平面磨床的热变形趋势图 (图10)。

由图可见, 床身作比较均匀的热膨胀, 砂轮主轴轴线和工作台同时被抬高, 对两者相对位置不会造成多大的变化; 而磨头的强烈发热以及由它引起的不均匀的立柱温度场, 则导致砂轮轴线相对于工作台产生明显的向上热位移和向后热倾斜。由此可见, 磨头主轴轴承是机床的主要热源。

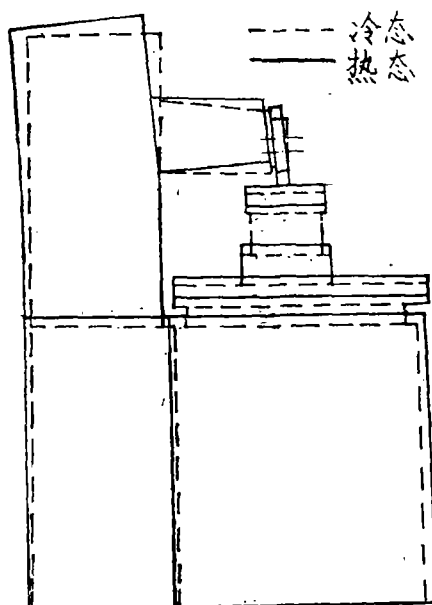


图 10 MM7120A 的热变形趋势图

## 机床进给系统的发热

为了进一步考察形成上述温度场和热变形的原因和规律, 分析整个内部热源的影响程度, 我们用分离热源的方法, 进行了孤立因素试验。本节和下节将具体讨论其试验结果。

### 1. 启动液压系统, 但不开动工作台

液压系统启动四个小时以后, 变量泵、变量泵电机和液压油池等处的温度趋于稳定, 它们的温升值分别为  $15.1^{\circ}\text{C}$ ,  $14.8^{\circ}\text{C}$  和  $14.7^{\circ}\text{C}$ , 三者之温升值颇为接近, 此时的机床温度场有如下特点:

(1) 床身底部温升较高, 顶部温升较低。底部和顶部的平均温差为  $2.3^{\circ}\text{C}$ , 而床身上同一水平面上各点的温升值则大致相同。显然, 这是由于床身下部油池温升高的缘故。

(2) 床身前面温升略高于床身后面的温升。两者的平均温差为  $0.6^{\circ}\text{C}$ , 这使工作台(位于床身前部)在被抬高的同时, 略有向后倾的趋势。

(3) 立柱的温升值几乎等于零。这说明液压系统发热主要影响床身部件的温度场, 对立柱和磨头的温度场几乎没有什么影响。

在这种温度场的作用下, 主轴芯棒和磨头、立柱、床身上各点在垂直方向发生的热位移如图 11 所示。此时, 芯棒的抬高主要是立柱底部的床身向上热膨胀造成的, 在单开液压系统的条件下, 通过相对测量, 测出主轴芯棒和工作台之间距离不断缩小(千分表读数为负值), 即工作台的抬高量大于芯棒的抬高量。这可以从床身温度的分布得到解释, 因为床身前部温升高于床身后部温升。

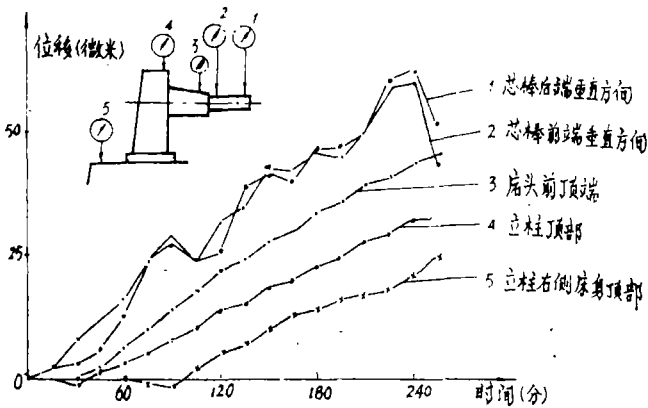


图 11 液压系统发热造成的有关点垂直方向上的热变形

由此可见，平面磨床的床身油池是一个不可忽视的次生热源。

2. 开动工作台纵向运动，其余部件不动

图 12 所示为两种纵向运动速度下各主要测点的温升曲线。由图可见，当  $v_{纵}$  从 16 米/分提高到 25 米/分时，油池油温由 29.6℃ 升高到 36℃，油缸温度由 29.4℃ 升高到 38℃，但

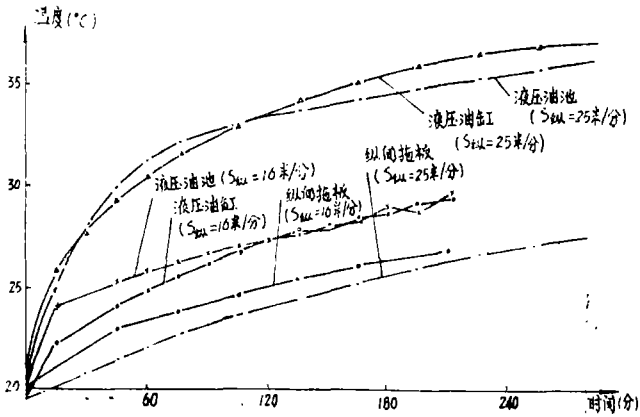


图 12 工作台纵向运动引起的温升

两种速度下拖板上面的温度相差不多。这说明液压系统的发热和工作台运动速度有很大关系。从床身温度分布情况来看，其上下平均温差由单开液压系统时的 2.3℃ 降至 1.2℃。这说明机床工作台开动起来以后，床身上面的导轨副、活塞副产生的摩擦热，对床身下部油池的发热，起着某种“均衡”的作用。反过来说，由于导轨副和活塞副不可能脱离工作台，把油池保留在床身下部，有利于均衡床身温度场。从改善机床热态特性的观点看来，MM7120A 型精密平面磨床的这种设计方案是正确的。

主传动系统的发热及其对策

图 13 为单独开动磨头电机及砂轮主轴时,主轴前轴承、静压油箱和砂轮电机的温升曲线。当  $n_{\text{砂}} = 3000$  转/分时,主轴前轴承温度高达  $51.2^{\circ}\text{C}$ ,静压油箱油温达  $48^{\circ}\text{C}$ ,砂轮电机温度为  $34.2^{\circ}\text{C}$ 。在这些热源的作用下,形成了磨头和立柱极不均匀的温升(图 14),这必然会造成整个立柱部件严重的热变形,最终导致砂轮主轴轴线的垂直热位移和热偏斜。

由图 15 可见,砂轮电机以  $n_{\text{砂}} = 3000$  转/分开动 4 个小时以后,主轴芯棒前端抬高了 122 微米,后端抬高了 92 微米,芯棒在 150 毫米长度内倾斜了 30 微米,这个后倾角比全机开动时还要严重。当砂轮电机转速改为  $n_{\text{砂}} = 1500$  转/以后,芯棒前端抬高量为 60 微米,后

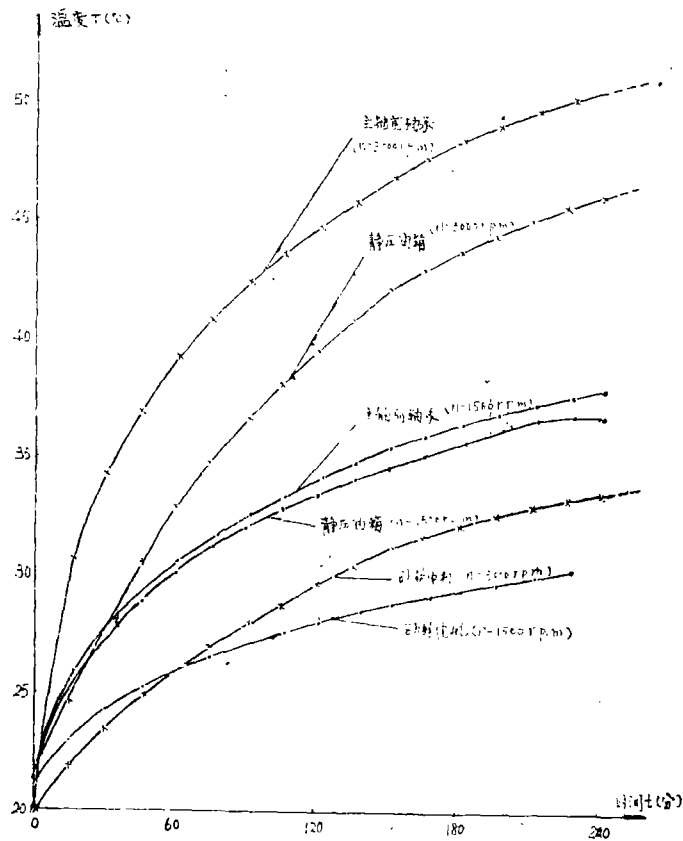


图 13 单开主电机时的温升曲线

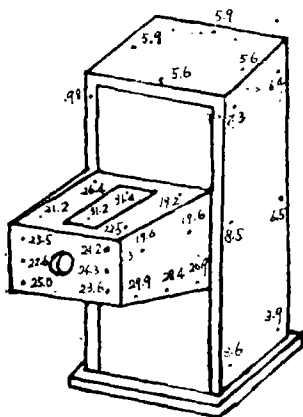


图 14 单开主电机时磨头和立柱的温度场

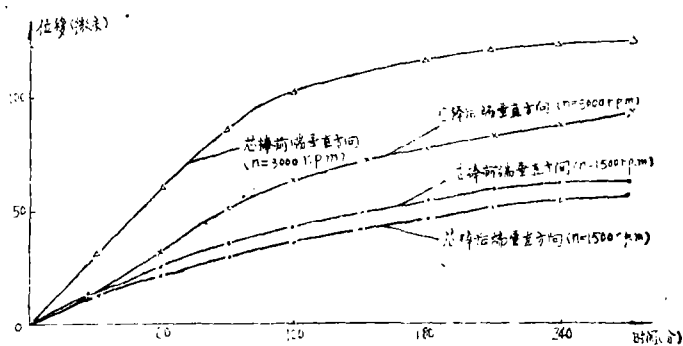


图 15 单开主电机时主轴轴线的热位移

端抬高 54 微米，在 150 毫米长度内倾斜了 6 微米。抬高量不及  $n_{砂} = 3000$  转/分时的一半，倾斜量只有它的五分之一。由此可见，磨头主轴轴承的发热和砂轮主轴转速有很大的关系，主轴轴承的确是该机床上最主要的热源。

对策性的试验

如上所述，既然主轴静压轴承是机床的主要热源，那么能否用控制静压轴承油温的办法来抑制机床的热变形呢？对此我们作了一个简单的模拟性试验。

我们在主轴转速  $n = 1500$  转/分空运转 4 个小时，使机床达到热平衡以后，打开静压油箱的上盖，用电风扇从外部对静压油箱进行强制冷却。经过了三个小时，机床进入了一个新的热平衡状态，此时静压油箱的油温从  $37.1^{\circ}\text{C}$  降至  $31^{\circ}\text{C}$ ，主轴前轴承温度由  $37.9^{\circ}\text{C}$  降至  $33.2^{\circ}\text{C}$ （图 16）。机床上各主要测点的位移变化情况见图 17。由图可见，芯棒前端和后端

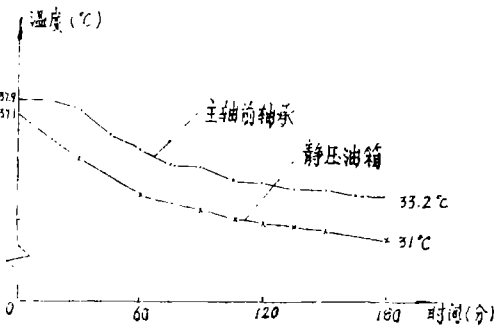


图 16 对静压油箱进行强制风冷时的温度变化

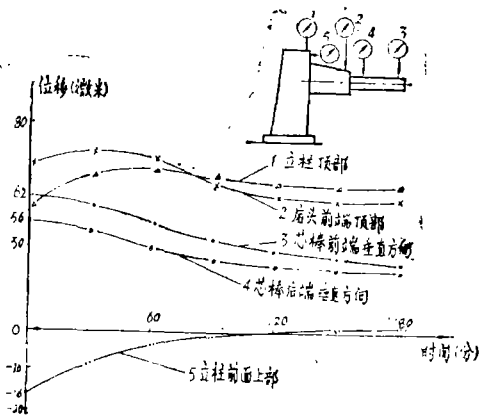


图 17 对静压油箱进行强制风冷时机床垂直方向的位移变化

的垂直热位移由 62 微米、56 微米，降为 48 微米和 46 微米，即芯棒整体向下平移了 10 微米，倾斜度在 150 毫米长度内减少了 4 微米。立柱前面上端的后倾量由 16 微米减至零。

这个对策性的预备试验说明：降低静压油箱的油温，确实能有效地控制机床的热变形。由于时间和条件的限制，我们仅仅从油箱外部用风扇进行冷却，而且油温只降低了  $6.1^{\circ}\text{C}$ ，就将变形减少 20%，可以设想，如果用热管，或其他方法从静压油箱的内部使其油温始终保持在  $20^{\circ}\text{C}$  左右，则会取得更好的效果。这个试验为我们下一步研究精密平面磨床的热变形对策提供了良好的启示。

通过磨削试验表明磨削热和冷却液对精密平面磨床的温升和热变形影响不大。在此不一赘述。

结 论 与 建 议

1. 在热变形试验中，应以机床主要热源的实际温升值  $T$  达到其稳定温升值  $T_B$  的 90~95%，作为机床达到热平衡的标准。建议修改 JB2278—78 部颁标准中关于“每小时温升不

超过  $5^{\circ}\text{C}$ ，机床即达到热平衡”的规定，应根据机床热容量、散热系数和最大温升值的大小来规定达到热平衡时的温升速率。

以中小型机床 ( $\tau_1 \approx 1$ 小时) 为例：

当  $T_B = 30 \sim 40^{\circ}\text{C}$  (普通机床)，每小时温升  $3 \sim 4^{\circ}\text{C}$  ( $T_B$  大者取大值)

$T_B = 10 \sim 20^{\circ}\text{C}$  (精密机床)，每小时温升  $1 \sim 2^{\circ}\text{C}$  ( $T_B$  大者取大值)

2. 根据以上建议，MM7120A 型精密平面磨床在常用运动参数下达到热平衡的时间约为四个小时，热平衡时各主要热源的温度和温升值如表 3 所列。

表 3

测点 主轴转速(转/分)	主轴承		静压油箱		液压油箱		纵向油缸	
	温度	温升	温度	温升	温度	温升	温度	温升
1500	37.9	17.7	37.2	17.2	38.0	17.7	37.4	17.2
3000	49.2	29.0	45.2	25.0	37.8	17.6	37.7	17.5

### 3. 机床的温度场：

床身上下的温度分布比较均匀，这是由于床身导轨和纵向油缸的摩擦热被床身下部液压油池发热均衡得比较好的缘故。但床身前部温升略高于后部温升。

磨头是机床上发热最严重的部件，而且磨头下部的平均温升高于上部平均温升。

立柱是机床上对热变形最敏感的一个部件，呈现很不均匀的温度分布。立柱前面温升高于后面温升，立柱中部和上部温升高于下部温升。这是由于磨头部件发热后，向立柱作单向传热的缘故。

### 4. 机床的热变形及其对加工精度的影响：

床身作整体膨胀，使立柱和工作台同时抬高，而且工作台略有向后倾的变形趋势。

磨头温升较高，受热后膨胀并向上翘曲。

立柱尺寸高大瘦弱，又受到上述不均匀温度场的作用，故产生较大的抬高和向后热倾斜，导致磨头主轴轴线相对于工作台产生较大的抬高和热倾斜，直接影响平面磨削的尺寸精度和几何形状精度。因此，立柱是该机床对热变形最敏感的部件。

### 5. 由此可以得出结论：

主轴承和静压油箱是机床的主要热源，立柱是机床热刚度最薄弱的环节。

6. 实测表明，MM7120A 型精密平面磨床在冷态和热态下，均能保证几何精度合格，在所规定的精度范围内，我们认为该机床具有较好的热态特性。

7. 为了进一步提高精密平面磨床的加工精度，赶超世界先进水平，建议通过进一步的试验，采取以下热变形对策：

(1) 降低主轴承的温升，控制磨头部件的发热，是减少精密平面磨床热变形的主要措施。为此建议改进静压轴承结构（如用薄膜反馈式），用热管或冷冻机来大幅度降低静压油箱和主轴承的温升。

(2) 均衡立柱的温度场，提高立柱的热刚性。为此，建议把垂直导轨从立柱前面移至

立柱中部,使磨头的热量同时向立柱的前面和后面传递,以便减少立柱前后面的温差,改善立柱内壁的筋肋布置,采用双层壁结构,以提高立柱的横向热刚度;改善磨头电动机风扇的排风方向,使之不直接从背面上部吹出,而使热风在立柱空腔内回旋一周后,再从立柱背面下部百叶窗排出,以利于均衡立柱上、下、前、后的温度分布。

(3)改善纵向工作台导轨的结构,减少摩擦发热,相应地采用发热更小的液压元件,以便在更低的温升水平上,保持床身均匀的温度场。

### 参 考 文 献

- [1] 张伯霖,机床热变形,机床, No. 1—2 (1979)。
- [2] 张伯霖等,机床热变形的试验与研究(第二届全国机床试验研究班教材),一机部机床研究所(1981)。
- [3] 复旦大学数学系编,数学物理方程,(1978)。
- [4] Л.Г.列依特曼著,王寿民译,机床零部件热位移的计算,机床, No. 5, (1980)。
- [5] Salje E. Wärmeformationen und steifigkeiten bei Werkzeugmaschinen, Werkstatt und Betrieb, 3 (1967), 100。
- [6] Алфелов В, И, Приближенный метод расчета температурных смещений в станках, Станки и инструмент, 10 (1973)。
- [7] P.D.Dunn, Heat pipes, (1978)。
- [8] 吉田嘉太郎,机床热变形及其对策,应用机械工学, 4 (1978)。
- [9] В. М. Дмитриев 著,孙庚午译,机床热变形对加工精度的影响,机床 No. 10 (1983)。
- [10] G. Spur 著,刘海鹰、张伯霖译,数控机床的热态特性,上海机床, No. 4 (1979)。

## A Study on Thermal Deformation of Precision Surface Grinding Machine

Zhang Bolin   Zhuang Youtu   Cui Dechang

### Abstract

This article analyzes the heat sources, temperature field, thermal deformation of precision surface grinding machine model MM7120A and their testing results. It presents the influences of the thermal deformation on the accuracy of surface grinding, and puts forward some suggestions for improving the thermal behaviours of surface grinding machines. In this article the authors make a new view about reaching heat balance in the testing of thermal deformation of machine tools.