

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

高等学校教材



机械制造中的 热变形

JIXIEZHIZAOZHONG DE REBIANXING

田维贤 主编

华中理工大学出版社

机械制造中的热变形

田 维 贤 主 编

江苏工业学院图书馆
藏书章

华中理工大学出版社

内 容 提 要

本书是根据国家教委高等学校机械制造工艺及设备专业教学计划与教学大纲的要求编写的。主要论述了机械制造中热变形的机理、控制方法和机床热态特性参数的测试技术;介绍了运用有限差分 and 有限元的数值计算方法;对温度场和热变形进行了精确的计算。该书有两个显著特点:其一是反映了现代机械制造业中发展的新要求;其二是用多学科的理论来论述机械制造中热变形的机理及控制对策。本书充分地体现了相关的多种学科的相互渗透和内在联系及其配合应用。内容新颖、深入浅出,既有理论分析,又有实际的测试技术分析。

该书适合于高等学校机械制造专业 30—40 学时的教学用书,也可作为机制专业的工程技术人员及研究生的参考用书。

机械制造中的热变形

主 编 田维贤

责任编辑 弘 菱

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社印刷厂印刷

*

开本:850×1168 1/32 印张:8.125 字数:196 000

1992 年 8 月第 1 版 1992 年 8 月第 1 次印刷

印数:1-1 000 册

ISBN 7-5609-0685-0/TH·60

定价:2.14 元

(鄂)新登字第 10 号

前 言

由于近代科学技术的发展,机械制造工艺系统的热变形,尤其是机床(包括数控机床与加工中心机床)的热变形,日益引起国内外科学技术界的重视,因此,研究热变形对零件的精密加工与自动化加工的影响,并采取相应措施以减少或消除热变形,是生产技术发展所提出的要求,也是现代机械制造工业所面临的重要课题。

本书是根据国家教委高校机制工艺及设备专业的教学计划与教学大纲的要求而编写的,着重介绍热变形方面的基本知识、基本理论及控制方法。其具体内容为:第一章主要介绍工艺系统热变形问题及其对策;阐述了研究热变形问题的起因与机理;分析了热变形在宏观上的控制对策。第二、三、四、五章主要介绍传热的基本理论及导热微分方程的求解,并阐述了有限差分法及有限元法等数值计算的基本原理。第六章主要介绍了机床热态特征测试技术,突出温度与热变形测试与试验方案及其试验数据处理。

机械制造中的热变形课程是技术基础课中的一门新课。本书适合该课程 34—40 学时教学用书,是机械专业学生的必修教材,也可作为从事机制专业的工程技术人员及研究生的参考用书。

本书由武汉工学院田维贤主编,参加编写的人员有:龚崇龄、柯常忠、代珏、易义松。本书由华侨大学精密机械工程系系主任张伯霖教授主审。在此之前,曾由武汉工学院机械工程一系余敏教授审阅过全稿。他们对此书给予了热情的指导并提出了许多宝贵意见。特在此表示衷心的感谢。本书还引用了有关教材、文献资料,谨借出版之际向其著者表示诚恳的谢意。

本书在编写过程中虽严于要求,重视基本理论,注意理论联系实际,尽量做到解决工程实际问题,但是由于知识水平和编写时间

有限,书中不足和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

1991年7月于武工桂竹园

主要符号表

符号	物理量名称及其单位
A	面积、截面积, m^2
a	热扩散率, 导温系数, m^2/s
c	比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$
F	力, N
G	投射辐射, W/m^2
g	重力加速度, m/s^2
J	有效辐射, W/m^2
k	传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
L	长度、高度, m
m	质量, kg
Q	热量, J
Φ	热流量, W
q	热流密度, 比热流量, W/m^2
R	热阻, K/W ; $^\circ\text{C}/\text{W}$
r	热绝缘系数、比面热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$; $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$
T	热力学温度, K
t	摄氏温度, $^\circ\text{C}$
V	体积, m^3
v	速度, m/s
X	角系数
α	对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
β, α_T	热(体积)膨胀系数, K^{-1} ; $^\circ\text{C}^{-1}$
δ	厚度, m
ϵ	黑度
θ	过剩温度, $^\circ\text{C}$
λ	导热系数, 热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$
μ	动力粘度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$

ν	运动粘度, m^2/s
ρ	密度, kg/m^3
τ	时间, s

相似准则

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad \text{努谢尔特(Nusselt)准则}$$

$$Re = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad \text{雷诺(Reynolds)准则}$$

$$Pr = \frac{\gamma}{\alpha} = \frac{\mu \cdot c}{\nu} \quad \text{普朗特(Prandtl)准则}$$

$$Gr = \frac{\beta g L^3 \Delta t}{\nu^2} \quad \text{葛拉晓夫(Grashof)准则}$$

目 录

主要符号表	(I)
相似准则	(II)
第一章 绪论	(1)
§ 1-1 工艺系统热变形对加工精度的影响	(1)
§ 1-2 国外机床热变形研究概况及我国的研究现状	(5)
§ 1-3 机床热变形的机理	(7)
§ 1-4 控制工艺系统热变形的对策	(11)
§ 1-5 机床热变形的研究内容及研究方法	(17)
第二章 传热的基本知识	(19)
§ 2-1 热量传递的三种基本方式	(19)
§ 2-2 导热基本概念及傅立叶定律	(25)
§ 2-3 简单体的一维稳态导热	(29)
§ 2-4 对流换热原理与计算	(40)
§ 2-5 辐射换热原理与辐射换热计算	(68)
第三章 导热微分方程式及一维稳态导热计算	(93)
§ 3-1 导热微分方程式	(93)
§ 3-2 等截面细长轴的一维稳态导热	(107)
第四章 数值法求解温度场	(123)
§ 4-1 有限差分法的基本原理	(124)
§ 4-2 二维稳态导热差分方程及一维非稳态导热差分方程	(129)
§ 4-3 有限差分方程的求解	(143)
§ 4-4 应用实例	(147)
第五章 热变形与热应力	(154)
§ 5-1 热变形与热应力的基本概念	(154)
§ 5-2 解析法求解一维热变形	(161)
§ 5-3 机床热变形的近似计算	(169)

§ 5-4	有限单元法的基本原理	(177)
§ 5-5	有限单元法求解平面热变形	(192)
第六章	机床热态特性测试技术	(209)
§ 6-1	热态特性参数的基本概念及测试方案	(209)
§ 6-2	机床热态特性简介	(218)
§ 6-3	试验数据处理	(231)
§ 6-4	机床热态测试技术的发展	(240)
附录		(243)
参考文献		(247)

第一章 绪 论

随着现代精密加工和自动化技术的发展,人们逐步认识到在机械加工中,工件的加工精度受到“机床-夹具-刀具-工件”构成的工艺系统各个环节热变形的影响。据德国阿亨工业大学 H. 勃鲁明分析,在现代机床上被加工工件的制造误差中,因热变形所引起的误差有时高达 50%;英国伯明翰大学 J. 派克连尼克调查表明,在精密加工中,由于热变形引起的误差约占总制造误差的 40—70%;1985 年前苏联莫斯科自动化工程研究所 A. V. 普希提出,机床热变形引起的加工误差占 25—75%;日本垣野義昭也有类似的估计。这些数据资料表明,工艺系统热变形对加工精度的影响是十分重要的,它促使国内外许多学者开始注重对热变形及其控制方法的研究。

§ 1-1 工艺系统热变形对加工精度的影响

下面分别论述工艺系统各个环节的热变形对加工精度的影响。

一、工件的热变形

在加工过程中,一般工件加工除了考虑因切削热的影响而产生的热变形以外,对于大件加工还应考虑热辐射的影响所产生的热变形;对于精密工件加工又应考虑环境温度变化的影响而产生的热变形。例如,加工轴类零件时,一般对径向尺寸精度控制较严格,若直径相同的轴类零件,开始切削时工件温升为零,随着加工产生切削热,工件直径逐渐变大,切削结束时温升最高,此时直径的变化也最大。在切削过程中,逐渐增大的直径变化量均被刀具切

除掉。因此工件冷却后将出现近尾架处直径大,而近主轴箱处直径小的倒锥度轴零件。

通过对磨削 400mm 长的精密丝杠的测量可知,由于工件受热伸长将产生螺距加工的累积误差。常温下,一般丝杠磨削时工件温度平均高出室温 3.5℃左右,也高于机床母丝杠的温升。若机床母丝杠和工件丝杠的温度相差 1℃,则螺距的累积误差为

$$\begin{aligned}\Delta L &= \alpha' L \Delta T \\ &= 11 \times 10^{-6} \times 400 \times 1 \\ &= 4.4 \mu\text{m}\end{aligned}$$

式中, α' 为工件的线膨胀系数, $11 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$; L 为工件长度, mm; ΔT 为温升, $\Delta T = \Delta t$, K。

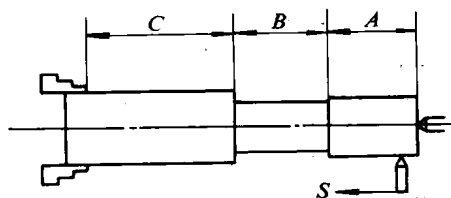
即工件将出现 4.4 μm 的螺距累积误差。对于 5 级丝杠, 400mm 长度上螺距累积误差的允许值只有 5 μm 左右。因此只要温差超过 1℃, 则丝杠螺距加工精度就无法保证, 必须采取措施减少热变形。在导轨磨床上磨削高 600mm, 长 2000mm 的床身导轨面, 由于加工中导轨面对床身底面的温差为 2.4℃, 在被加工的导轨面上形成 20 μm 的上凸面, 当导轨面磨削完工后, 又经冷却, 使导轨面呈现 20 μm 的下凹面, 显然未能达到机床导轨加工的几何形状精度技术要求。

二、刀具热伸长

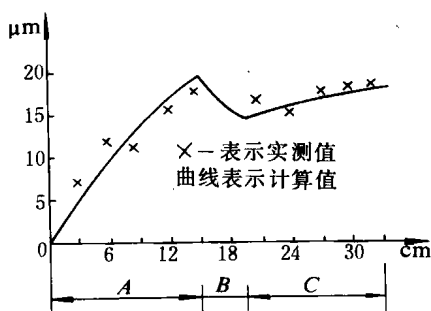
在切削过程中, 尽管切削热只有极少部分传给刀具, 但因刀体小, 热容量小, 仍然会导致刀具很高的温升, 产生较大的刀具热伸长, 直接影响加工精度。

若加工时间短, 且工件还有后继光整加工, 刀具的热伸长可以不予考虑。但有时刀具热伸长量会高达 30—40 μm , 此时伸长是不容忽视的。当车削长轴时, 由于车刀逐渐伸长, 因此工件会形成“倒锥度”轴。如果改变加工条件, 可减少车刀热变形对工件的影响。例如, 在某车床上加工图 1-1(a) 所示的阶梯轴, A、C 段为加工部位, B 为非加工部位。车刀在加工完 A 段后, 而在 B 段走刀时会自然

冷却,再进入C段继续加工直至结束。其车刀的热伸长曲线如图1-1(b)所示。刀具的热效应一方面会产生刀具热伸长,另一方面也会加速刀具磨损。这是因为在一定的切削温度下,刀具材料中的铁原子得到更多的活动能量,会加快它扩散到切屑中去,或者刀具材料和切屑熔在一起而被切屑带走,同时在高温下刀具材料有可能被氧化,形成强度较弱的碳化物,这些都导致刀具磨损加剧,刀尖长度缩短,使工件



(a)



(b)

A 段切削条件: $v=2.4\text{m/s}$, $t=0.75\text{mm}$

$s=3.75\text{mm/s}$

B 段切削条件: $v=2.4\text{m/s}$, $t=0.5\text{mm}$

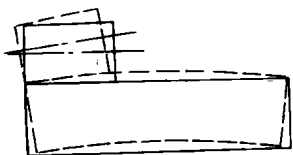
$s=3.75\text{mm/s}$

图 1-1 车刀加工时的热伸长曲线

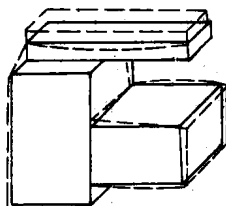
尺寸加大,其效果正好与刀具热伸长相反,也和工件热效应相反。切削过程中,刀具热伸长与刀具磨损同时出现,两者能否相互补偿、抵消,要视具体条件而定。但一般说来,刀具的磨损量较小,热伸长较大。

三、机床的热变形

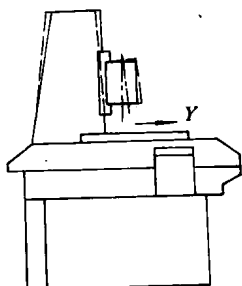
图 1-2 所示为各类机床热变形的示意图,从图中可以看出热变形对加工精度的影响。机床启动后,由于各部件有不同的温升,导致各部件相互位置改变,影响被加工工件的加工精度。在精密加工中,机床切削功率的消耗一般比空载功率消耗小,这样空载功率



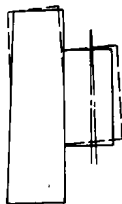
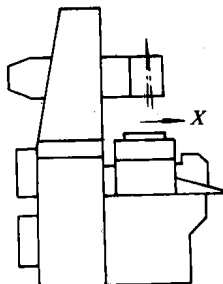
(a) 车床(垂直平面内的变形)



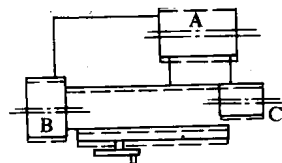
(b) 卧式镗床(升降台式)



(c) sip-2p 坐标镗床

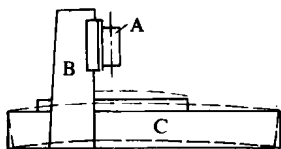


(d) 立铣立柱与主轴箱



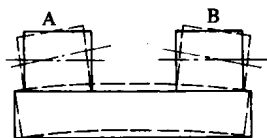
A—砂轮架 B—头架 C—尾架

(e) 外圆磨床



A—砂轮架 B—立柱 C—床身

(f) 导轨磨床



A—砂轮架 B—头架 C—尾架

(g) 双端面磨床

图 1-2 各类机床热变形示意图

消耗为精加工机床的主要热源。因此,用机床空载运转下的热学特性,即温升、热平衡时间、热态几何精度作为衡量机床质量的重要指标。也就是当机床各部件在运转一段时间后,传入的热量与散出的热量相等或接近相等时,称这段时间为热平衡时间。此时各部件的变形及它们间的位置便处于相对稳定,称这种情况下的几何精度为热态几何精度。一般精密机床各部件的温升小,热变形也小。如某些中小型坐标镗床,其主轴箱内部的最大温升仅有 $2-3^{\circ}\text{C}$,而外壳的温升在 2°C 以下,各点的温差不到 1°C ,产生的热变形较小。在机床达到热平衡之前,其热态几何精度一直变化不定,影响工件的加工精度。如坐标镗床的热变形导致主轴轴线的热位移和热倾斜,影响它的定位精度和主轴轴线对工作台的垂直度。又如,外圆磨床在开车后,砂轮主轴轴承的温升不断提高,砂轮架受热变形,砂轮主轴轴线向前移动,砂轮主轴与工件主轴之间的距离不断减小,致使在定程磨削时工件的加工直径变小,加工工件直径不稳定,且因砂轮主轴侧母线和上母线倾斜,导致工件产生几何形状误差和螺旋线缺陷。

综上所述,机床热变形对精密机床及自动化机床的危害性较为严重,也较难于解决。因此,本书主要讨论机床热变形,至于上述刀具、工件、夹具、量具的热变形所引起的加工误差,在掌握机床热变形的机理及解决方法后,也易于得到正确的处理方法。

§ 1-2 国外机床热变形研究概况及我国的研究现状

一、国外机床热变形研究概况

最早发现机床热变形现象并进行研究的国家是瑞士。1933年瑞士通过对坐标镗床进行测量与分析,发现机床热变形是影响定位精度的主要因素。从那时算起,工艺系统热变形的研究历史至今仅 50 多年。在本世纪 30—40 年代,人们对各种机床热变形进行分散研究,侧重在对机床热特性作实用性的改进。50—60 年代,人们

对各种机床开展了系统的试验研究,建立了简化条件下的若干理论,进行定性分析与对比试验。随着宇航技术及微电子工业的发展,以及机械制造工业日益精密化、自动化,机床热变形对加工精度的影响才逐渐引起了重视。1984 年在美国威斯康辛大学召开的国际生产工程研究学会(CIRP)第 34 届年会上,会议主席威士荷姆在发言中强调,研究工作不能简单地靠直接经验,而要靠科学的方法。对于机床热变形而言,即基于精确的测试,并进而追究其机理,探索机床热变形规律,使正确的感性认识提高到理性认识。60 年代以来,电子计算机的应用,有限元法计算技术的推广,新测试手段的出现,使机床热变形研究开始进入了定量分析阶段。世界许多国家对机床热变形开展了试验研究,其中以日本、前西德发表的论文和研究成果最多。目前,世界各国已系统地进行研究和理论探讨,日本首先提出了“热刚度”的概念,初步确立了热变形研究理论向控制机床热变形的 CAD 和 CAM 方向发展,并取得一定成果。

二、我国机床热变形研究的现状

我国在 50 年代就开始了机床热变形的研究。当时大连工学院曾在一台内圆磨床上定程磨削一批零件并进行了测量,应用统计法画出零件尺寸随着加工时间变化的关系是呈指数曲线,其第一个零件与最后一个零件尺寸相差达 $40\mu\text{m}$,通过分析,发现砂轮修整器支架随着加工时间增长而向后退。导致此现象的最重要原因是机床热变形。因此进行了结构改进,使加工误差控制在 $10\mu\text{m}$ 以下,也提高了生产效率。

60 年代初,根据我国的高精度机床急需发展的迫切要求,北京机床研究所、上海机床厂、沈阳第一机床厂、昆明机床厂等单位都对热变形做了大量的研究工作,积累了不少的经验与数据。

机床热变形是我国在 70 年代末机床出口碰到的重要问题之一。即机床热态几何精度超差问题成为当时影响出口贸易的关键问题之一。为了集中力量联合攻关,由浙江大学、华侨大学等发起,并得到全国 100 多个院校、科研单位和工厂的大力支持,于 1984

年 11 月成立了“全国热变形研究会”，定期召开交流热变形研究成果与经验的学术研讨会。使我国在机床热变形研究工作方面取得很大成绩，加速了机床工业的发展。

§ 1-3 机床热变形的机理

一、机床热变形机理

1969 年前西德柏林工业大学施布和斐绪较早地描述了热源和加工精度之间的关系。如图 1-3 所示。热源在各种不同工作条件下(如驱动源消耗功率、机械传动摩擦、切削工作状态等)，产生一定的发热量，在各部位不同的热特性与不同的边界条件下，将热量传给各部位，使其受到一定的温升，并发生热位移，破坏了各部分冷态时正确的相对位置关系，从而降低了机床加工精度。

1977 年日本垣野义昭提出更为详细的热变形机理。即如图 1-4 所示，在机床加工过程中，由于机床在一定工作条件 $\{n\}$ 形成的内部热源和周围环境不同的外部热源作用下，产生热量 $\{Q\}$ ，传给机床各部件，使其构件各部位产生温度分布 $\{\phi\}$ ，在零部件的不同结构尺寸、几何形状和约束条件下，因其热膨胀的作用，可能引起拉、压、弯、扭等各种位移 $\{u\}$ ，在这些变形中，与加工精度有关的各零、部件相对位置变化，必然导致机床加工精度的降低 $\{\delta\}$ 。

以上机床热变形机理对剖析机床热变形过渡过程是十分重要

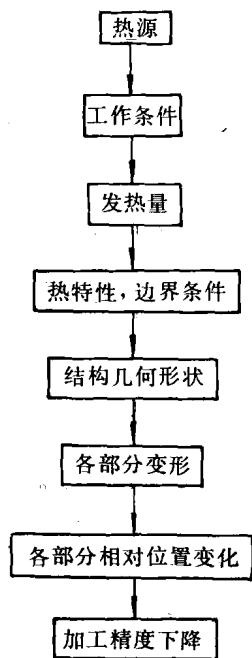


图 1-3 机床热变形机理