

562185

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

高等学校教材



精密加工技术

JINGMI JIAGONG JISHU

刘贺云 柳世传

华中理工大学出版社



精密加工技术

刘贺云 柳世传

华中理工大学出版社

内 容 提 要

本书是根据国内一些高等学校开设的精密加工技术课程的讲授内容,并结合多年来教学工作的实际经验而编写的。

全书共分六章,内容包括:绪论、精密加工的理论基础、精密加工的环境条件、金刚石刀具切削加工、磨料加工、精密加工机床及微细加工技术等。

本书取材新颖、内容丰富,介绍了最近国内外精密加工研究的部分成果和生产实践经验。

本书可作为高等工科院校机械制造专业的教材,也可供工厂、研究单位从事机械制造和仪器制造工作的工程技术人员学习参考。

精 密 加 工 技 术

刘贺云 柳世传

责任编辑 陈培斌

*

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沔阳印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 11.5 字数: 272 000

1991年12月第1版 1991年12月第1次印刷

印数: 1-1 000

ISBN 7-5609-0646-X/TH·53

定价: 3.06元

(鄂)新登字第10号

经 理 人 员 证 书 号 1111111111

编写说明

为适应精密加工技术的应用和发展的需要,目前在一些工科院校的本科生和研究生的教学中都开设了精密加工技术课程。本书可作为工科院校教师和学生的教材,也可作为从事机械加工专业的工程技术人员的参考书。

本书绪论,第一章,第二章,第五章由刘贺云编写;第三章,第四章,第六章由柳世传编写。全书李铁民主审。

诚恳地希望有关同志与读者对本书的缺点和错误提出批评指正。

编 者

1991年6月

目 录

绪 论	(1)
一、机械制造技术的发展	(1)
二、精密加工技术的现状	(2)
三、精密加工技术的研究内容	(4)
第一章 精密加工的理论基础	(7)
§ 1-1 材料的微观特性	(7)
一、晶体结构	(7)
二、材料的强度	(8)
三、材料的缺陷	(12)
四、加工单位与切削阻力	(13)
五、位错的测量	(15)
六、加工极限	(15)
§ 1-2 过渡切削过程	(16)
一、概述	(16)
二、过渡切削过程	(17)
三、最小切入深度	(19)
四、堆积现象	(21)
五、微量切削的碾压过程	(22)
§ 1-3 微量切削的表面质量	(24)
一、刀具切削性能对加工精度的影响	(24)
二、切削过程的分析	(25)
三、工件材料的影响	(27)
四、加工变质层	(29)
第二章 精密加工的环境条件	(35)
§ 2-1 隔振	(35)
§ 2-2 热稳定性	(36)
§ 2-3 防尘与净化	(38)
第三章 金刚石刀具切削加工	(40)
§ 3-1 概述	(40)
§ 3-2 金刚石刀具的特点	(42)
一、金刚石刀具的特点	(42)
二、金刚石的结构	(43)
§ 3-3 金刚石刀具切削加工	(48)
一、金刚石刀具的几何形状和结构	(48)
二、金刚石刀具的安装角	(51)
三、切削用量的选择	(53)

四、冷却润滑液的选择	(55)
五、金刚石刀具的磨损	(56)
§ 3-4 金刚石刀具的制造	(58)
一、金刚石的挑选和定向	(58)
二、金刚石的劈开方法	(60)
三、金刚石刀具的刃磨	(61)
四、金刚石刀具的设计	(65)
§ 3-5 金刚石刀具的代用材料	(66)
第四章 磨料加工	(70)
§ 4-1 超精密磨削和镜面磨削	(70)
4.1-1 超精密磨削	(70)
一、概述	(70)
二、超精密磨削表面形成机理	(70)
4.1-2 镜面磨削	(73)
一、概述	(73)
二、镜面磨削表面形成机理	(73)
4.1-3 超精密磨削和镜面磨削的表面质量	(74)
一、砂轮特性及其修整对磨削表面粗糙度的影响	(75)
二、磨削用量对磨削表面粗糙度的影响	(82)
§ 4-2 研磨和超精密研磨	(86)
一、研磨	(86)
二、超精密研磨	(94)
三、研磨和超精密研磨实例	(95)
§ 4-3 软粒子研磨和抛光	(104)
一、弹性发射加工 (EEM)	(104)
二、机械化学研磨 (MCL) 和抛光 (MCP)	(106)
三、液体动力研磨抛光	(106)
四、磁流体精研	(109)
五、磁力研磨	(111)
§ 4-4 砂带磨削	(114)
一、概述	(114)
二、砂带及其磨削机理	(115)
三、砂带磨削装置 (机床) 及其基本结构	(115)
四、砂带磨削工艺	(118)
五、砂带磨削工艺实例	(119)
第五章 精密加工机床	(120)
§ 5-1 机床的精度指标	(120)
§ 5-2 超精加工机床的实例	(122)
§ 5-3 主轴轴系	(127)
§ 5-4 精密加工机床中的导轨	(133)
§ 5-5 精密驱动系统	(139)
一、精密主轴的驱动	(139)

二、工作台的驱动	(140)
§ 5-6 精密定位、对准及微位移技术	(142)
一、精密定位	(142)
二、对准技术	(144)
三、微位移机构	(148)
第六章 微细加工技术	(152)
§ 6-1 概述	(152)
§ 6-2 光刻蚀技术和光电成型加工	(153)
一、光刻蚀技术	(153)
(一) 光刻原理	(153)
(二) 光刻工艺的一般过程	(153)
(三) 光刻工艺特点及发展状况	(156)
二、光电成型加工	(157)
§ 6-3 电子束加工与光刻技术	(159)
一、电子束加工与光刻的原理	(159)
二、电子束的热效应与电子束加工	(160)
三、电子束的化学效应与电子束光刻	(161)
四、电子束加工和光刻的工艺特点	(162)
§ 6-4 离子束加工	(162)
一、离子束产生的基本原理	(163)
二、离子束加工	(163)
三、离子束加工的特点	(165)
§ 6-5 x射线复印	(165)
一、x射线的产生原理	(165)
二、x射线曝光装置	(166)
三、x射线复印的几何误差	(166)
§ 6-6 激光加工	(168)
一、概述	(168)
二、激光的产生机理及其特性	(169)
三、激光加工原理及特点	(171)
四、激光加工的应用	(172)
五、影响激光加工精度的主要因素	(173)
参考文献	(175)

绪 论

一、机械制造技术的发展

在国民经济中,机械制造工业担负着为各个经济部门提供必要的装备和技术的任务。机械制造工业的发展是国民经济发展的关键,一切工业发达的国家都非常重视机械制造工业的发展,而且一般都使它的发展超前于其他工业和国民经济的发展。

现代机械制造技术主要向以下几个方面发展:

(1) 为适应新型工程材料迅速发展和应用的加工要求,在传统的机械加工方法和特种加工方法的基础上,发展成为一种新的工艺方法和复合加工方法。

(2) 为满足现代科学技术飞速发展的要求,加工技术向高精度加工技术发展。出现了所谓“精密加工技术”、“超精密加工技术”。

(3) 加工技术向自动化方向发展,如:数控技术(NC)、柔性制造技术(FMS)及计算机集成制造系统(CIMS)等。

多年来,随着电子工业、航天工业和核工业的发展,推动着机械制造技术朝着提高加工精度的方向发展。机械制造工业之所以要致力于提高加工精度,主要目的在于提高产品的质量和性能,提高其稳定性和可靠性,促进产品的小型化及零件的互换性,提高装配的生产效率,推进自动化生产。

加工精度的高低标志着人类认识自然、改造自然的能力,可以作为人类文明进程的一项重要指标。我国古代科学家在天文观测中创造了许多先进的天文仪器,东汉张衡(公元78~139)发明了“水运浑天仪”;唐代一行(公元683~727)和梁令王赞研究制造了“黄道游仪”和“浑天铜仪”;宋代苏颂(公元1020~1101)建造了“水运仪象台”;元代郭守敬(公元1231~1316)创造了“简仪”等等。西汉时期的指南车、记里鼓车都应用了较复杂的齿轮传动。这些设计巧妙、制造精细的创造表明我国当时已经有了相当水平的精密加工技术。

大家都知道瓦特(James Watt 1736~1819)发明了蒸汽机,蒸汽机被尊为大工业之母。实际上,早在瓦特的蒸汽机出现以前的1690年,法国物理学家巴本(Denis Papin 1647~1712)就设计了活塞式蒸汽机。在此之后,许多人对蒸汽机进行过多次的改进和试验,但都没有获得成功。其重要原因之一是当时的加工精度太低,那时的蒸汽机的汽缸壁与活塞之间的间隙有10mm左右,为了避免漏气,在间隙处塞些软木或布。直到1774年英国工厂主,发明家威尔金森(John Wilkinson 1728~1808)设计并制造了大型镗床,在1775年用这台镗床为瓦特加工了汽缸体,其精度达到了1mm的精度,蒸汽机的效率从0.5%提高到2~4%,从而达到了实用的程度。正是由于大型镗床的应用,也就是说,由于加工精度的提高,蒸汽机才得以大量制造和应用。

意大利物理学家伽里略(Galileo Galilei 1564~1642)首先用望远镜观察天体,实现了天文观测的突破,这是借助于荷兰人汉斯·里波西(Hans Lippershey)发明的光学镜片加工技术。

从本世纪40年代以来,世界处于科学技术革命的浪潮中,形成了许多新兴的科学技术,如核技术(1942年第一个原子反应堆建成)、电子技术(1948年研制成功具有放大电流、电压功能的晶体三极管)、航天技术(1957年世界上第一颗人造卫星发射成功)、激光

技术(1960年第一台红宝石激光器研制成功)。

为了适应宇宙航行、计算技术及激光技术等的发展需要,精密加工技术的发展也异常迅速。60年代研制成功了加工精度为 $0.25\mu\text{m}$ 的高精度磨床和加工精度为 $0.64\mu\text{m}$ 的半球面精密车床。在此之后,精密加工技术有了飞速的发展,现在加工精度已达到了 $0.05\mu\text{m}$ 。

同时,精密加工技术的提高也有力地推动各种新兴技术的发展。例如,超精密加工使陀螺仪的精度提高了一个数量级,由此,战略导弹的命中的距离误差由 500m 降低到 $50\sim 150\text{m}$ 。一些研究成果表明,如果将飞机发动机转子叶片的几何误差从 $60\mu\text{m}$ 降低到 $12\mu\text{m}$,表面粗糙度从 $R_{0.5}\mu\text{m}$ 降低到 $0.2\mu\text{m}$,那么发动机的压缩效率将会大幅度提高。又如传动齿轮的齿形误差和齿距误差若能从目前的 $3\sim 6\mu\text{m}$ 降低到 $1\mu\text{m}$,则齿轮箱单位重量所能传递的扭矩将提高近一倍。再如计算机磁盘的存贮量在很大程度上取决于磁头与磁盘之间的距离,即所谓“飞行高度”,目前“飞行高度”一般为 $0.3\mu\text{m}$,近期可望达到 $0.15\mu\text{m}$ 。要实现如此小的“飞行高度”,除要求有较高的磁盘传动精度之外,对磁盘基片的机械加工和涂覆的平面度以及表面质量的要求也很高。这种磁盘的记忆密度,在1957年为 $300\text{bit}/\text{cm}^2$,而1982年已达到 $254\times 10^5\text{bit}/\text{cm}^2$,即在这25年内增加了近一万倍。这除了由于原材料和涂覆技术的改进之外,在很大程度上应归功于超精密加工带来的磁盘基片加工精度的提高和表面粗糙度的降低。

所以,精密加工和超精密加工是实现和发展高技术的重要手段。

二、精密加工技术的现状

精密加工技术是研究精密加工原理、加工方法和加工工具、设备设计及制造的一门学科。

这里所说的“精密”一词,按照人们的习惯,可以理解为较高精度,再高的精度称之为“超精密”或“极高精密”。精度的高低是与人类历史发展的阶段相关联的,过去认为是精度高的,在今天和明天就可能不认为是高精度了。所以,对“精密”二字应作如下理解:首先,它是与生产力发展水平相关联的;其次,“精密”是相对的,即它相对于某一参考精度是比较高的,或者是更高的。

图0-1所示的是各类加工机床的加工精度随时代发展和预测的情况。由图可见,普通机械加工的加工精度从过去的毫米级正向微米级发展,精密加工则从十微米级向毫微米级发展。

从图0-1也可看出,“加工”这一概念在今天已经极大地扩充了它的含义,它既包括各种传统的机械加工和特种加工,一般称之为去除加工或分离加工,也包括了各种材料处理方法、变形加工及结合加工。因此,在精密加工技术中,“加工”这个词应理解为一个很广泛的概念。精密加工技术包括精密和超精密机械加工,如计算机磁盘及各种金属反射镜的超精密镜面加工,也包括所谓微细加工技术(Micro-fabrication),亦称毫微米工艺(Nanotechnology),典型的代表是电子束、光子束、离子束加工,如大规模集成电路制造中的刻蚀加工以及离子注入、分子外延等工艺技术。

精密加工技术是一门边缘技术科学,它的发展依据是现代基础科学(数学、物理、化学、天文学和地学)、技术科学(控制论、信息论、微电子技术及计算技术)与机械制造工程学的密切结合。

本世纪50年代以来,随着航天技术、计算技术、激光技术和自动控制技术的发展,世界

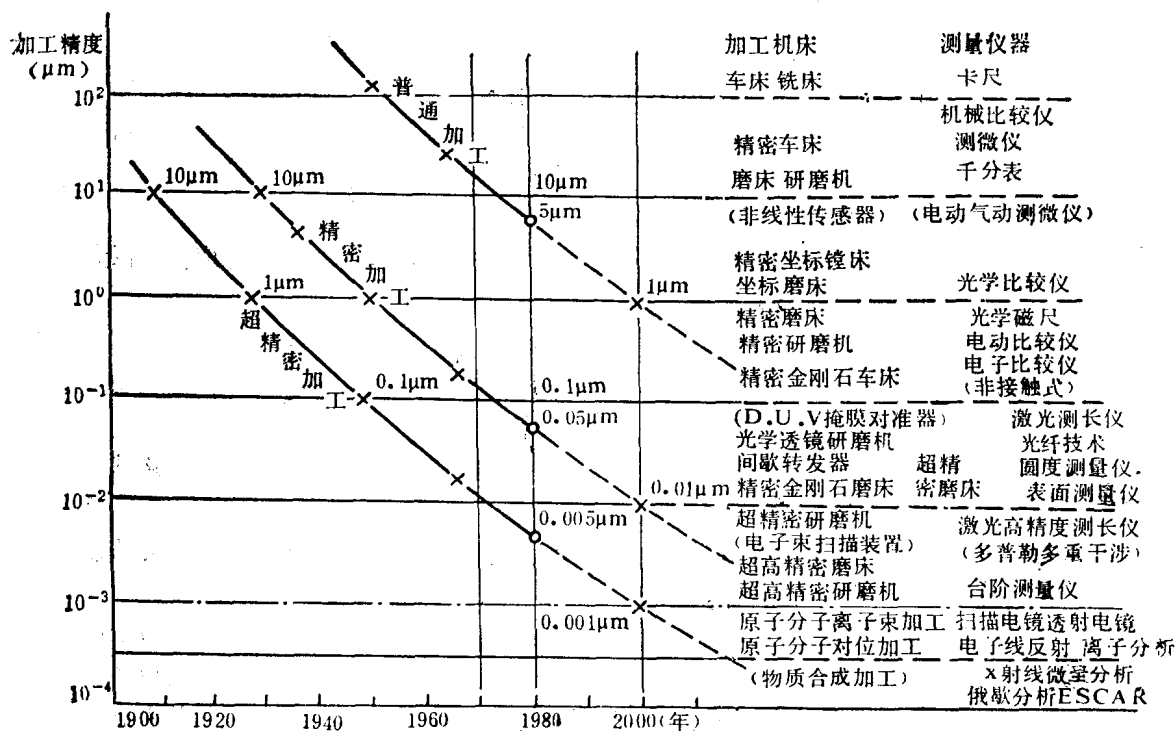


图0-1 加工精度的发展和预测

各国对精密加工加紧了研究工作。60年代初,加工精度为 $0.25\mu\text{m}$ 的高精度磨床研制成功。美国Union Carbide公司1962年开发了多孔石墨空气轴承,制成了Du Pont 1号车床,成功地用单晶金刚石刀具进行了镜面切削,机床回转精度达到了 $0.125\mu\text{m}$ 。随后完成的Du Pont 2号车床可加工直径150mm的球面,形状精度可达到 $0.1\mu\text{m}$,尺寸精度为 $0.5\mu\text{m}$ 。1968年美国Moore公司采用空气静压轴承制成了Moore精密车床,成功地实现了非球面镜面加工。1972年制成的 ω -X车床采用了闭环数控,加工零件直径为380mm,形状精度为 $0.6\mu\text{m}$,表面粗糙度 $0.025\mu\text{m}$,同时开发了半球面气浮轴承,回转精度为 $0.3\mu\text{m}$,径向刚度为 $118\text{N}/\mu\text{m}$,温升控制在 1.1°C 以下。1976年Ex-Cell-O公司采用了这种半球面气浮轴承制成了超精密车床,其径向精度为 $0.1\sim 0.13\mu\text{m}$,轴向精度为 $0.15\sim 0.18\mu\text{m}$,径向刚度为 $284\text{N}/\mu\text{m}$,轴向刚度为 $361\text{N}/\mu\text{m}$ 。日本东京芝浦电气的生产技术研究所采用新型的球面和半球面气浮主轴,主轴的回转精度,径向为 $0.03\mu\text{m}$,轴向为 $0.01\mu\text{m}$,径向刚度为 $25\text{N}/\mu\text{m}$,轴向刚度为 $83\text{N}/\mu\text{m}$ 。切削铜达到表面粗糙度 $0.006\mu\text{m}$ 。

与此同时,还研制出测量精度为 $0.5\mu\text{m}$ 的三坐标测量机,测量精度为 $0.02\mu\text{m}$ 的高精度圆度仪。

大规模集成电路的发展,促进了微细加工技术的发展。集成电路的发展趋势是集成电路中各种元件的微型化,即在微小的面积上容纳更多的电子元件。因此,提高精密加工精度,以减小电路微细图案的最小线条宽度就成了提高电路集成度的关键。许多国家正努力探索减小“线宽”的技术途径。目前已经能加工出 $0.1\mu\text{m}$ 的线宽,有的正在探索在硅基片上以黄金作为导体加工 20nm 的线宽。近年来美国试图使集成电路的线宽降低10倍。英国格拉斯哥大学于1985年用电子束加工技术实现了 30nm 线宽的加工。

三、精密加工技术的研究内容

长期以来,精密加工、超精密加工的应用范围很狭窄,精密、超精密机床仅用于工具、夹具的制造生产中。近十几年来,随着科学技术的飞跃发展,一些工业发达国家已经改变了这种状态,将精密、超精密机床直接装备在生产车间,用于产品零件的加工。精密、超精密加工走向大批产品生产的现状,使人们看到,在保证很高的加工精度和表面质量的同时,必须保证产品的低成本和高效率。这对精密加工技术提出了更高的要求。

近年来,各工业发达国家投入了很大的人力和物力进行这方面的工作,并取得了巨大的成绩。

精密加工和超精密加工主要包括以下三个领域:

1) 超精密切削加工 如采用金刚石刀具进行超精密切削,加工各种镜面。它成功地解决了用于激光核聚变系统和天体望远镜中的大型抛物面的加工。

2) 超精密磨削和磨料加工 如高密度硬磁盘的涂覆表面加工和大规模集成电路基片的加工。

3) 精密特种加工 如在大规模集成电路芯片上,采用电子束、离子束的刻蚀方法制造图形,目前可以实现的最小线宽为 $0.1\mu\text{m}$ 。

目前精密加工技术不再是一种孤立的加工方法和单纯的工艺问题,而成为一项包括内容极其广泛的系统工程。实现超精密加工,不仅需要超精密的机床设备和工具,也需要超稳定的环境条件,还需要运用计算技术进行实时检测和反馈补偿。只有将各个领域的技术成就集结起来,才有可能实现和发展超精密加工。下面对超精密加工技术的各方面的发展和现状作简要的叙述。

1. 超精密加工机床

超精密加工机床是实现精密加工的首要条件。世界各国都投入了很大人力财力进行这方面的研究工作,精密加工机床的性能、精度都有了极大的提高。当前主要的研究方向是提高机床主轴的回转精度、工作台的直线运动精度以及刀具的精密微量进给机构等。如美国劳伦斯实验室(Laurence Livermore Laboratory)于1983年研制成功的DTM-3型超精密车床,采用了高压液体静压轴承,刚性大、动态性能好;该机床采用了恒温油淋浴系统,油温控制在 $20^{\circ}\text{C} \pm 0.0025^{\circ}\text{C}$,有效地消除了加工时的热变形,该机床还采用了压电晶体误差补偿系统,使位移误差控制在 $0.013\mu\text{m}/1000\text{mm}$ 以下。这台机床的加工直径为 2100mm ,加工精度为 $0.025\mu\text{m}$ 。

2. 金刚石刀具

精密切削加工必须能够均匀地切除极薄的金属层,微量切除是超精密加工的重要特点之一。

金刚石刀具的刃磨是超精密切削中的一个重要问题。金刚石刀具的刃磨质量主要是两个方面:一是金刚石晶体的晶向选择,晶体的晶向选择正确与否对金刚石刀具的使用性能影响极大;二是金刚石刀具刃口的锋利性,即刀具刃口的圆弧半径,它关系到切削加工的最小切削深度,影响到微量切除能力和加工质量。目前,先进的国家可以刃磨出 $5\sim 20\text{nm}$ 的刃口半径,刀具表面粗糙度可达到 $R_a 0.0125\sim 0.006\mu\text{m}$ 。

3. 精密切削机理

微量切削过程中许多机理方面的问题都有其特殊性,如积屑瘤的形成,鳞刺的产生,切

削参数及加工条件对切削过程诸现象的影响,以及它们对加工精度和表面质量的影响等。为了提高精密加工的精度和表面质量,对这些切削机理方面的研究是非常必要的。

4. 超稳定的加工环境

精密加工必须在稳定的加工环境条件下进行,所谓稳定的加工环境主要是指恒温、防振和净化三个方面的条件。

精密加工必须在严格的多层恒温条件下进行,即不仅放置加工机床的房间应保持恒温,还要对机床本身采取特殊的恒温措施。例如美国劳伦斯实验室内的一台Moore双轴超精密车床安装在恒温室内,机床外部罩有透明塑料罩,罩内设有油管,对整个机床喷射恒温油,加工区的温度可以控制在 $20^{\circ}\text{C} \pm 0.06^{\circ}\text{C}$ 的范围内。

为了提高精密加工系统的动态稳定性,除在机床结构设计和制造上采取各种措施之外,还必须用隔振系统来保证不受外界振动的影响。例如美国劳伦斯实验室开发的DTM-3型车床采用了空气弹簧隔振装置,隔振的主轴部件的振动振幅为2nm,防止了1.5~2Hz的外界振动传入。

超精加工还必须有超净化的环境。例如,加工256K集成片时,环境的净化要求为在 1m^3 空间内,大于 $0.1\mu\text{m}$ 的尘埃数小于370;加工4M集成片时,净化要求为 1m^3 空间内,大于 $0.01\mu\text{m}$ 的尘埃数小于370。

5. 误差补偿

为了提高精密加工的精度,通常采用两种减少加工误差的措施:一种是所谓误差预防措施,即是通过提高机床的制造精度,保证加工环境的稳定性等方法减少误差源或减小误差,从而减小误差的输出;另一种是所谓误差补偿措施,即是消除或抵消误差本身的影响。这是通过对误差传递过程建立数学模型,测量或预测误差的输入,并以这些信息为依据,提供一个附加的输入数据,将它与未经校正的误差相加,达到抵消或者消除误差的目的。

分析和实践表明,当加工精度要求高于一定程度之后,利用误差预防措施来提高加工精度所花费的成本将按指数规律增长。采用误差补偿技术对机床加工系统进行精化,可以在精度较低的机床设备上加工出高一级精度的产品,降低产品的成本。

国内外一些高精度的加工设备,都是采用了在线检测和误差补偿技术来提高机床的加工精度的。例如一台精密加工机床的高精度空气静压轴承的径向跳动约为50nm,工作台的直线运动误差也是数十纳米,在此机床上就不可能加工更高精度的零件。但采用了误差补偿措施,可以将机床误差减小到10nm以下。上述的DTM-3型机床就配备了误差补偿系统。

6. 精密测量技术

精密加工技术和测量技术总是紧密相联的,在机械制造的发展各个阶段中,测量仪器的精度一般总是比机床设备的加工精度高一个数量级。目前精密加工中所使用的测量仪器多以干涉法和高灵敏度电动测微技术为基础,如激光干涉仪,多次光波干涉显微镜及重复反射干涉仪等。

我国的科学技术发展很快,60年代初我国的精密加工已经达到了很高的水平。当时我们已经生产出达到世界先进水平的高精度磨床,如高精度外圆磨床MGB1432、MGB1420,高精度平面磨床MGB7132、MGB7120。这类机床加工圆度为 $0.5\mu\text{m}$,平面度为 $5\mu\text{m}/1000\text{mm}^2$;表面粗糙度达到 $R_{\text{a}}0.01\mu\text{m}$ 。

近年来我国的精密加工技术有了迅速的发展,在一些高等学校、科研部门及工厂中比较广泛地开展了精密加工技术的研究工作,在理论和实践方面的研究工作都取得了很大的进

展。可以预料，随着我国社会主义建设的发展，必将对精密加工技术给予很大的重视，必将加速精密加工技术的研究、开发和应用。可以期望在“七五”期间在生产中实现稳定的微米级加工；在“八五”期间在生产中实现亚微米加工；在“九五”期间在生产中开始毫微米和纳米加工。即在15~20年内达到一些工业发达国家目前的水平，并争取在某些技术上达到或超过当时的国际先进水平。

第一章 精密加工的理论基础

§ 1-1 材料的微观特性

在普通的切削加工过程中, 可以认为被加工材料是均匀的、连续的、各向同性的。实际上常用的工程材料, 不论是金属材料还是非金属材料并非如此, 只是由于采用普通的切削方法加工时, 由于切削单位较大, 材料的不均匀性、不连续性和各向异性不能明显地表现出来。而在精密切削的领域中采用了微量切削方法, 加工单位很小, 材料的不均匀性质就不容忽视了。下面就材料的微观结构和性质进行较简单的分析。

一、晶体结构

固体物质可分为两大类: 晶体和非晶体。从外部特性来看, 晶体具有一定的外形, 有固定的熔点和凝固点; 而非晶体, 如玻璃、松香、沥青等则不具备此种性质。从其结构特征上来看, 晶体是由离子、分子或原子有规律地、周期地排列而成的, 即质点在空间的排列具有周期性、对称性。非晶体则不然。工程中常见的材料都是晶体。

近年来人们开发了一种固体物质的新结构, 称之为非晶态结构。这是使液态金属或合金快速冷凝, 其冷却速度大于 $10^5 \sim 10^6$ °C/s, 使之来不及结晶, 而使固态金属保留了金属液态无序排列的状态。这种非晶态结构不会形成晶粒, 没有晶界存在, 没有晶体的各向异性, 所以这种结构的材料具有许多特异的物理机械性能。

各种晶体物质, 或其晶格形式不同, 或其晶格常数不同, 主要是由于它的原子构造、原子间的结合力(结合键)的性质不同, 而使不同晶体表现出不同的物理、化学和机械性质。

一切金属物质在原子构造上的共同特点是其价电子数目少, 它与原子核之间的结合力小。金属晶体中的原子结合形成所谓“金属键”, 金属键的特点是所有原子都失去其价电子, 变为正离子, 在晶体中规则地排列起来, 而所有游离的自由电子则在各离子之间作高速运动, 形成所谓“电子云”。电子云与各离子之间的公有引力使金属被坚强地结合起来, 而离子与离子之间及电子与电子之间的斥力则与这种引力相平衡, 使金属处于稳定的晶体状态。

由于金属晶体中有这种形成电子云的大量自由电子存在, 使金属具有良好的导电性与导热性; 由于金属晶体是借助于电子云与各离子间公有引力的坚强结合, 使金属具有较好的塑性和较高的强度; 也由于这种坚强的金属键使得金属大都具有紧密排列的晶体结构, 且其晶体结构形式很少, 只有几种具有对称性的晶格形式。在金属元素中约有90%以上的金属晶体属于以下三种晶格形式: 面心立方晶格, 体心立方晶格, 密排六方晶格。

属于面心立方晶格的金属有铝(Al), 铜(Cu), 金(Au), 镍(Ni)及 γ -铁等。属于体心立方晶格的金属有铬(Cr), 钼(Mo), 钒(V)及 α -铁等。属于密排六方晶格的金属有铍(Be), 镁(Mg), 锌(Zn), 镉(Cd)等。

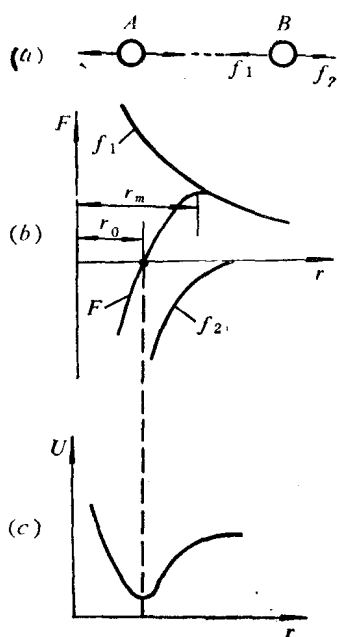
晶体又分为单晶体和多晶体。由于晶体中不同晶面上的原子密度的差异及不同方向上的原子结合力的差异, 单晶体表现了很强的各向异性。

工程上常用的材料多数为多晶体,它是由许多晶格方向不同的单晶体组成,多晶体的机械物理等方面的性能没有表现出各向异性。钢铁材料中晶体的尺寸一般为 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ mm左右,有色金属如铜、铝、锡、铅、锌等的晶粒尺寸较大,如镀锌钢板上可看到锌的晶粒尺寸可达几毫米至几十毫米。

二、材料的强度

1. 结合力和结合能

为了分析材料机械物理性能,首先讨论一下原子结合力,结合力有自由电子和离子之间的引力,离子之间的斥力和电子之间的斥力。



晶体中的原子是规则排列的,这些原子可以规则地排列在一定位置上,就是由于上述作用力达到平衡的缘故,也就是由于此作用力使原子处于最低势能造成的结果。

分析金属中原子的结合力和结合能,可以简化成两个原子来研究。可以认为金属中原子之间的结合力有两种:引力和斥力。这两种力都随着原子之间的距离的缩小而增大,当原子之间的距离缩小到一定数值时,斥力增大的速率比引力要快得多。

为了定量地分析,我们把 A 、 B 两个原子之间的引力 f_1 和斥力 f_2 及它们的合力 F 随原子间距 r 的变化曲线表示在图1.1-1中。

图1.1-1(b)中:

$$f_1 = K_1 r^{-n} \quad (1.1-1)$$

$$f_2 = K_2 r^{-m} \quad (1.1-2)$$

式中 K_1 、 K_2 为系数,指数 $m > n$ 。

$$F = f_1 - f_2 = K_1 r^{-n} - K_2 r^{-m} \quad (1.1-3)$$

图1.1-1 原子的结合力和势能

当合力 F 为零时,原子处于平衡位置 r_0 处。当然,处于平衡位置的原子并非静止不动,而是在引力和斥力的相互作用下不停地振动,平衡位置便是它们的振动中心。显然,固体所表现的弹性与图中所表达的引力和斥力曲线的形状有关。

原子间的结合力 F 用结合能 U 来表示,可以写成下式:

$$F(r) = - \frac{dU(r)}{dr} \quad (1.1-4)$$

当原子偏离平衡位置时, $r \neq r_0$,即打破了平衡状态。当 $r < r_0$ 时, $-\frac{dU(r)}{dr} < 0$,此时原子之间存在排斥力,把原子拉开,推向平衡位置。当 $r > r_0$ 时, $-\frac{dU(r)}{dr} > 0$,此时原子之间存在吸引力,把原子移近推向平衡位置。当 $r = r_0$ 时, $-\frac{dU(r)}{dr} \Big|_{r=r_0} = 0$,即在平衡状态下,原子处于最低势能。为使原子偏离平衡状态,就需要外力对它做功,提高其势能,此即固体所表现出来的弹性。

2. 理论强度和塑性变形

1) 理论强度

晶体变形的理论揭示了晶体强度的实质。一个晶体的切变强度就是它的临界分切应力，它决定于晶体滑移面上上下两层原子间的结合力。按照晶体滑移模型，使晶体滑移所需的临界切应力应使整个滑移面的原子从一个平衡位置移到另一个平衡位置。

我们把滑移面的相对滑移简化为如图1.1-2 (a) 2所示的两排原子的滑移。在未发生滑移时，每个原子都应处于最低势能的位置。假设产生滑移时， $A_1 A_2 A_3 \dots$ 一系列原子在外切应力 τ 的作用下，相对于 $B_1 B_2 B_3 \dots$ 一系列原子，从一个平衡位置平移到另一个平衡位置。

这两列原子间的结合势能，随着一系列原子的位置 x 的变化，可简化表示为正弦函数：

$$U = -A_0 \cos 2\pi \frac{x}{\lambda} \quad (1.1-5)$$

式中 A_0 是结合能变化的振幅， λ 是变化的周期，也是同排原子平衡位置的距离（原子间距）。使两排原子滑移的临界切应力即是两原子间的结合力的切向分量 $F(x)$ 。两原子间的结合力应是结合势能 $U(x)$ 对 x 的导数，则结合力的切向分量 $F(x)$ 可表示为：

$$F(x) = A \sin 2\pi \frac{x}{\lambda} \quad (1.1-6)$$

式中 A 为两排原子间结合力切向分量 $F(x)$ 变化的振幅。

图1.1-2(b)和(c)分别表示了 $U(x)$ 和 $F(x)$ 随 x 变化的曲线。

因为两列原子间滑移面面积 S 一定，则 $\frac{F(x)}{S} = \tau$ 即是滑移面上的分切应力， $\frac{A}{S} = \tau_m$ 即是此分切应力的最大值。则

$$\tau(x) = \tau_m \sin 2\pi \frac{x}{\lambda} \quad (1.1-7)$$

当 x 很小时，即当两列原子间发生较小的弹性变形时，为简化计算可认为

$$\sin 2\pi \frac{x}{\lambda} \approx 2\pi \frac{x}{\lambda} \quad (1.1-8)$$

由此(1.1-7)式可写成

$$\tau(x) = \tau_m 2\pi \frac{x}{\lambda} \quad (1.1-9)$$

又，当 x 很小时，两列原子间发生弹性变形，其应变为 $\epsilon = \frac{x}{a}$ ， a 为两列原子的间距。根据虎克定律

$$\tau = G\epsilon \quad (1.1-10)$$

比较(1.1-9)式，即有

$$\tau_m = G \frac{\lambda}{a} \cdot \frac{1}{2\pi} \quad (1.1-11)$$

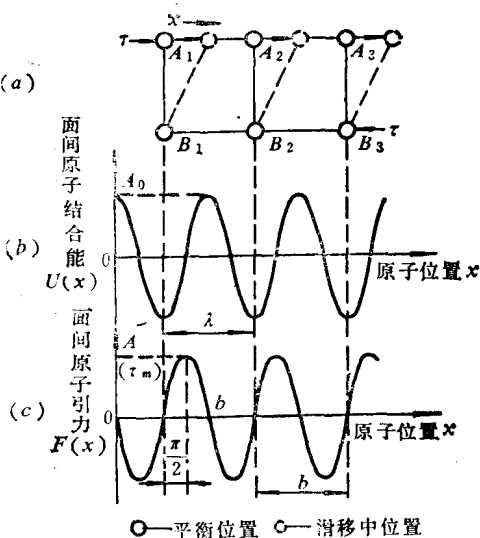


图1.1-2 两排原子间的结合能和结合力
(a)滑移面上，下两排原子；(b)两排原子间的结合能 $U(x)$ ；(c)两排原子间的结合力 $F(x)$

设此晶体为简单立方晶体，则 $\lambda = a$ ，所以

$$\tau_m = \frac{G}{2\pi} \quad (1.1-12)$$

式中 G 为切变模量。

用上述公式计算出的切变强度值即是理论切应力，但实际测得的临界切应力却远远低于理论值。表1.1-1给出了几种材料的切应力数值。

表1.1-1 几种材料的临界切应力

金 属	切变模量 G (MPa)	理论切应力 τ_m (MPa)	实际切应力 τ_m (MPa)
Al	24400	3830	0.786
Ag	25000	3980	0.372
Cu	40700	6480	0.490
α -Fe	689500	10960	2.75
Mg	16400	2630	0.393

从表1.1-1中可以看到，各种金属的临界切应力的理论计算值和实际测定值之差均达到3~4个数量级。这是由于把滑移简单理解为整个滑移面上的原子一起位移是不对的，滑移是位错的运动造成的。

2) 滑移和孪生

单晶体塑性变形的形式有两种：滑移和孪生。

滑移：是晶体的一部分相对另一部分沿一定晶面发生的位移。

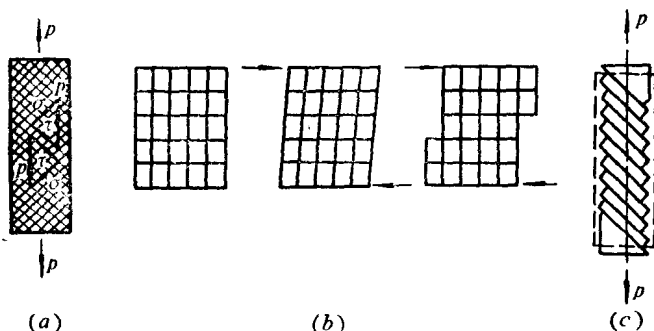


图1.1-3 晶体的滑移

如图1.1-3(a)所示，当拉伸一晶体试样时，外力 P 将在一定的晶面上分解为切应力 τ 和正应力 σ 。正应力只能引起晶格的伸长，并进一步把晶体拉断。而切应力则可使晶格在发生弹性歪扭之后，进一步造成滑移。即在切应力作用下产生滑移，滑移的结果会在晶体的表面上形成台阶（图1.1-3(b)），这种台阶的尺寸为原子间距的整倍数，只有在电子显微镜下才能观察到。

又，滑移的同时必然伴随有晶体的转动。如图1.1-3(a)，在某晶面上所分解的切应力产生晶体滑移的同时，正应力则组成一力偶，使晶体沿外力方向产生转动。

另外应该指出，滑移往往是沿着晶体中原子密度最大的晶面产生的。这是由于原子密度最大的晶面的间距最大，晶面之间的原子结合力最弱，所以在切应力作用下，容易形成晶面之间的相对滑动。如体心立方晶格中，原子密度最大的晶面是 $\{110\}$ 面，体心立方晶格中共有6种不同方位的 $\{110\}$ 面，即有六种滑移面，每种滑移面上各有两个对角线方向作为滑移方