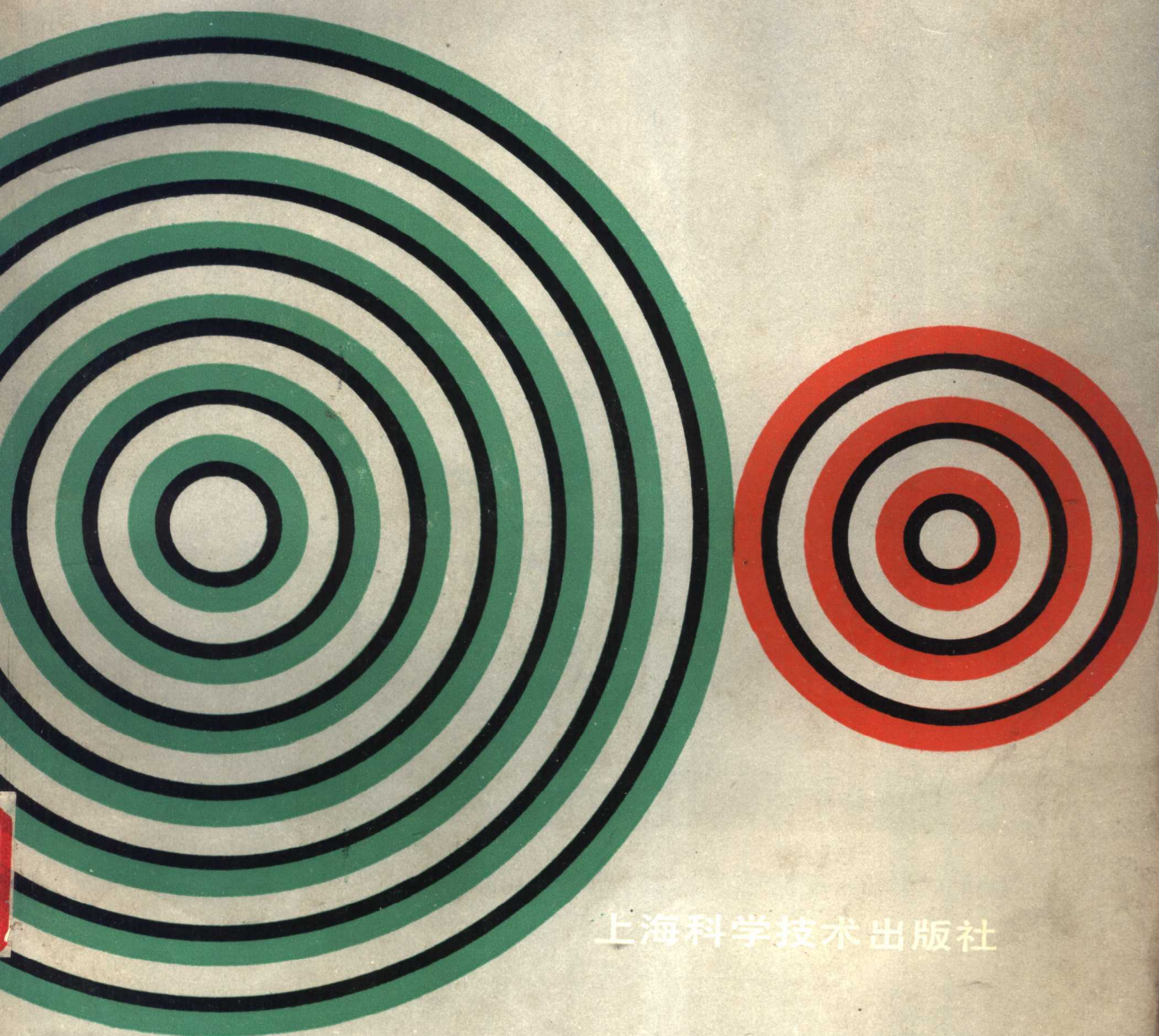


谭美田 编著

金属切削 微观研究

MICROSCOPIC STUDY OF METAL CUTTING



上海科学技术出版社

金属切削微观研究

MICROSCOPIC STUDY OF
METAL CUTTING

谭美田 编著

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书是作者关于金属切削、磨削过程微观研究的专门著作。应用近代先进的电子检测仪器,较为深入地揭示科研、生产实践中的一些切削、磨削问题;还对近年来这一领域的技术发展和重要文献作了介绍。

主要包括:切屑形成、积屑瘤、鳞刺、切削力、切削温度、刀具磨损、表面质量、磨削机理、砂轮堵塞、砂轮磨损、磨削烧伤、磨削划伤、磨削液与供液方式等。

本书可供高等学校机械制造专业的师生参考,也可供业余大学、中等专业学校师生,以及有关工程技术人员参考。

金 属 切 削 微 观 研 究

MICROSCOPIC STUDY OF METAL CUTTING

训美田 编著

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行

江苏扬中印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 17.25 字数 408,000

1988 年 4 月第 1 版 1988 年 4 月第 1 次印刷

印数: 1-3,100

ISBN 7-5323-0882-0/TG·38

统一书号: 151.39·2584 定价: 4.25 元

前 言

近代科学技术在飞速发展,有人称当今的时代为“知识爆炸”的时代。在这个时代里,就金属切削领域而言,一个突出的特点,是不断采用性能优良的新材料和提出一系列难切削的新课题。由于职业的缘故,作者在工作中常常碰到一些诸如新型不锈钢、钛合金、高温合金等难加工材料的切削与磨削问题。应用切削工具加工时,遇到了很多麻烦,例如刀具急剧磨损,工件表面质量恶化,不但生产效率极低,有时简直无法加工。求助于现成的切削理论,对一些问题的解释不清。这就迫使我应用一些先进的电子检测仪器,去探讨这些难加工的机理和奥秘。就是这样,使我走上了艰难的微观探索的历程。

由于要进行新的探讨,就要借助一些近代先进的检测仪器,使我了解到一些先进仪器的点滴知识;为了突破制备样品存在的问题(须知这是一项最为关键、最为繁琐,甚至令人头痛的事情),又学习了一点先进的制样技术;在进行一些具体课题的时候,又获得了一些微观研究方面饶有兴趣的知识。在取得以上知识的过程中,我曾经花费过很大的力气,尽管眼下对这些知识理解得不够深刻。但是,要是把这些分散的、不全面的知识,汇集起来,较为系统的总结一下,那对其他进行金属切削研究的工作者,也许会有一些益处的。如果能使他们了解一些有用的资料,或者引出一些新的研究成果,我将认为编写本书是有意义的。

在我致力于金属切削的微观探讨时,荣幸地结识了许多在金属切削研究方面造诣很深的教授、专家和志趣相投的同事,没有他们的密切配合与热情帮助,许多研究课题进展不会是顺利的,写出本书更是不可能的。

北京材料工艺研究所庾鹏高级工程师、于凤舞高级工程师,是从事电子显微镜技术的专家,他们与作者密切合作,本书中许多珍贵的电子显微镜照片,都是他们摄制的。

北京钢铁研究总院赵先存高级工程师,是材料冶金方面的专家,他对作者进行大力支持和帮助,都使我难以忘怀。

曾与作者长期合作的魏永胜师傅,他在生产实践方面的精湛技艺,为作者提供了许多宝贵的知识。

象上海同济大学侯镇冰教授、哈尔滨工业大学袁哲俊教授、上海工业大学周家宝教授、华中工学院诸兴华教授、北京工业学院于启勋教授、中国科学院物理研究所陈熙琛教授、李方华副研究员等,都曾从不同方面给予大力帮助。作者借此机会表示衷心地谢意。

本书对作者在切削与磨削领域所作的一些探讨,进行了较为详细地介绍。当然,在所触及的领域中,还存在着相互对立的理论和不同的观点,本人才疏学浅,在认识和整理这些论点当中,一定会有错误和不当之处,敬请读者指教,以便改正。

同时,在编写此书中,也参考了许多名著和科技论文,介绍了其中作者认为很有价值的内容。所参考的文献,已经列入书末,对此作者也深表谢意。

本书承蒙同济大学侯镇冰教授和蔡在璽副教授给予全面审阅和指正,作者十分感激。

上海科学技术出版社的责任编辑史全富同志给予极大帮助,在此致谢。

一九八六年二月

作者于北京

目 录

第一章 绪论	1
第一节 引言	1
第二节 金属切削近期研究动向	2
第二章 金属切削微观研究的基本概念	5
第一节 晶体结构	5
第二节 金属的形变	9
第三节 位错	11
第四节 晶界	18
第五节 金属中的扩散	22
第六节 金属的强化	25
第三章 切屑形成的微观研究	30
第一节 研究概况	30
第二节 从连续介质力学到位错力学	35
第三节 切屑形成模型与变形区划分	40
第四节 切屑卷曲规律及其应用	51
第四章 积屑瘤、鳞刺的微观研究	58
第一节 积屑瘤的研究概况	58
第二节 积屑瘤的形成机理	60
第三节 积屑瘤的相对稳定性问题	63
第四节 积屑瘤的影响	65
第五节 积屑瘤的控制与利用	66
第六节 鳞刺的研究概况	68
第七节 不锈钢拉削鳞刺	70
第八节 鳞刺的影响	74
第九节 消除鳞刺的途径	75
第五章 切削力与温度的微观研究	83
第一节 从传统研究到微观分析切削力	83
第二节 切削温度的研究概况	88
第三节 红外照相法测定切削温度	90

第四节 扫描电镜法测定切削温度	93
第六章 刀具磨损的微观研究	97
第一节 刀具磨损的研究概况	97
第二节 刀具磨损的种类	99
第三节 刀具的粘附磨损	104
第四节 刀具的沟槽磨损	109
第五节 刀具磨损的测量与传感	122
第七章 表面质量的微观研究	127
第一节 表面质量与零件寿命	127
第二节 表面质量的研究方法	131
第八章 磨削机理的微观研究	151
第一节 砂轮表面地形	151
第二节 磨削过程的研究	159
第三节 磨屑形成的机理	162
第四节 磨削过程的基本参数	168
第九章 砂轮堵塞的微观研究	175
第一节 砂轮堵塞的形貌	175
第二节 砂轮堵塞的形成机理	178
第三节 影响砂轮堵塞的因素	181
第十章 砂轮磨损的微观研究	185
第一节 砂轮磨损的形态	185
第二节 砂轮磨损的检测	186
第三节 砂轮磨损的机理	199
第四节 砂轮的修整	201
第十一章 磨削烧伤的微观研究	206
第一节 磨削烧伤问题的研究概况	206
第二节 磨削烧伤的形貌	207
第三节 磨削烧伤的检测	213
第四节 磨削烧伤的形成机理	222
第五节 减少或消除烧伤的途径	224
第十二章 磨削划伤的微观研究	229
第一节 磨削划伤的形貌及种类	229

第二节 磨削划伤的形成机理	233
第三节 影响磨削划伤的因素	238
第四节 减少或消除磨削划伤的途径	242
第十三章 磨削液与供液方式	252
第一节 磨削液的作用	252
第二节 磨削液的选用	254
第三节 磨削液的供应方式	257

第一章

绪 论

第一节 引 言

金属切削作为一门技术,可以远远追溯到古代,而应用切削机床加工金属,那是十八世纪下半叶、十九世纪中期的事情了。当然,真正作为一门科学,进行周密的、详尽的理论研究,还是近百年开始,一直探索至今。

在这门科学研究里面,浸透着万千科学家、学者、工程师和工人的心血。作者很难准确地说出谁是这门科学的奠基人。但是,基麦(Thime)教授、泰勒(F. W. Taylor)博士、默钱特(M. E. Merchant)博士、美国的肖(M. C. Shaw)、费尔德(M. Field)、联邦德国的欧匹茨(Opitz)、柯尼希(W. König)、英国的特伦特(E. M. Trent)、苏联的洛金(T. H. Лозаго)、日本的白井英治、星光一,以及我国的许多专家、教授都为这一领域,做出了不可磨灭的贡献。

金属切削原理方面的研究,经过几代人的探索,已经达到了较高的研究水平。但是,由于时代的局限和科技手段的羁绊,人们还不可能把这门科学研讨到尽善尽美的阶段。探索着、深化着、发展着,这是普遍的规律。正如爱因斯坦所说:“科学不是而且永远不会是一本写完了的书,每一个重大的进展,都带来了新问题,每一次发展,总要揭露出新的更深的困难。”

如果说,金属切削的研究,在过去的几十年间,国内外的学者,借用光学显微镜进行了大量的研究,称为“光学显微镜时代”的话,那么在今天,就已经进入“电子显微镜时代”了。或者叫做从宏观研究进入到微观研究阶段了。

十七世纪以前,人们对客观世界的认识只能停留在肉眼观察的水平上,而人的视力只能看到0.1 mm以上的东西。自十七世纪初,列文虎克(Leeuwenhoek)发明光学显微镜以来,人们第一次看到了细胞这个生物的单元,为研究细微结构,提供了一个有力的武器。但这时分辨本领,也只能达到400~200 nm左右。

1931年,德国科学家鲁斯卡(Ruska)制成了第一台能放大20倍的电子显微镜。1933年他又使用短焦距磁透镜获得了约一万倍的象,突破了光学显微镜的界限。经过6年技术改进,1939年德国西门子公司开始出售商品电子显微镜,1939年~1949年的十年间,由于样品制备只限于复型技术,所以没有什么进展。1954年,德国学者斯约特拉切出了10 nm以下的生物切片;1957年英国学者贺尔须用化学和电抛光法制成了铝薄膜,并在电子显微镜下看到了晶体中的线缺陷——位错。1956年曼特拍出了耿菁铜的点阵条纹象,并把它与晶体结构联系起来,自此,电子显微镜把衍射花样与象紧密结合起来,把象与晶体组织结构联系起来,从而使电子显微镜和电子显微学得到了蓬勃发展。在六十年代内,电子衍射理论、衍衬理论和技术逐渐成熟,电子显微镜仪器分辨率达到0.5 nm左右,六十年代末到七十年代初,富里埃光学的兴起,使电子衍射理论和物理光学结合起来,发展成相位衬度理论。

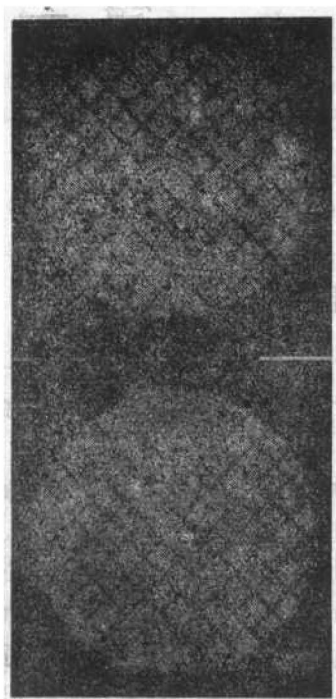


图 1-1 1932 年由鲁斯卡首次拍摄的铜网电子象(上)($\times 12$)和光学象(下)^[1]

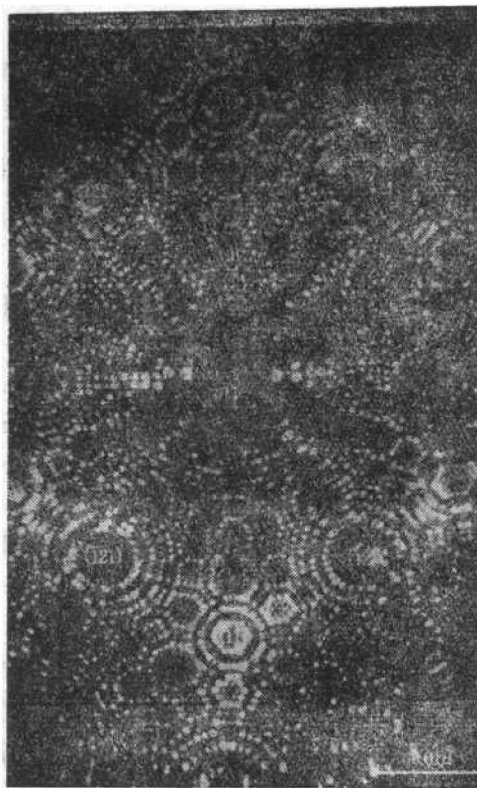


图 1-2 钨的原子排列^[1]

到今天,电子显微镜的仪器分辨率达到 0.062 nm 。出现了高分辨电子显微镜;而在相位衬度理论指导下,人们在电子显微镜下看到了单个原子的象和晶体中原子的象,使人们的眼睛深入到了原子世界之中,从而大大深化了人类对于客观世界的认识,如图 1-1 和图 1-2。目前,电子显微镜技术已经在冶金、矿物、地质、生物、机械、医学、物理和化学各个方面得到广泛应用。当人们在电子显微镜下看到瑰丽奇妙的微观世界时,会产生一种赏心悦目的感觉。

那么,在进入电子显微镜时代的今天,金属切削领域进行了那些课题研究,有什么重大突破和研究成果,以及未来的研究动向等,这是从事金属切削的科技工作者所关注和感兴趣的。因此,就从金属切削近期的研究动向谈起吧。

第二节 金属切削近期研究动向

本世纪六十年代,出现了数控机床和适应控制机床,随后计算机技术飞速发展,出现了计算机辅助设计(CAD)和计算机辅助制造(CAM),甚至已经推动人们向整体计算机控制的全自动化工厂的目标进军。

尤其是新兴的宇航工业的诞生,一些难加工材料,诸如不锈钢、钛合金、高温合金、超高强度钢、复合材料等的相继采用,常规的切削工具已无能为力,传统的金属切削原理,受到了强有力的挑战。因此,这就必然要求人们掌握更多的有关金属切削基础理论的知识,探索难加工的机理和奥秘。例如,有关金属切削加工中的切屑形成机理,刀具各种磨损机理,磨屑

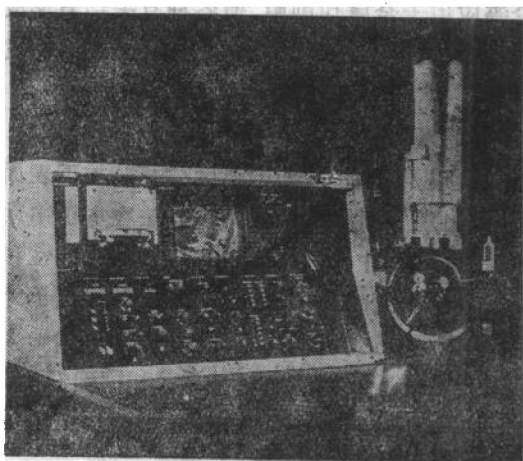


图 1-3 扫描电子显微镜

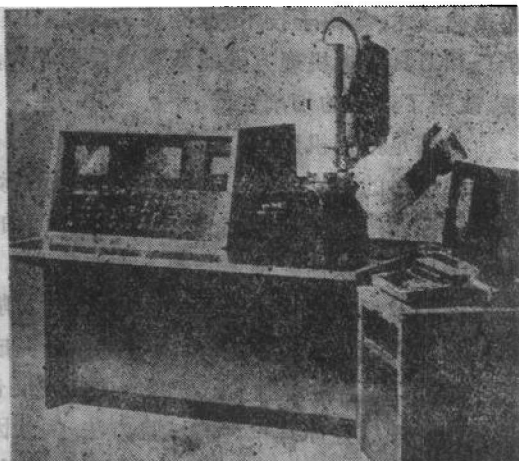


图 1-4 扫描电镜与电子探针

形成机理, 砂轮堵塞机理, 磨削烧伤形成机理等, 否则, 要想改善工件表面质量, 提高劳动生产率, 降低生产成本, 显然是不可能的。

自六十年代末开始, 美、日、德、英等国, 普遍采用近代先进的电子检测仪器, 进行金属切削的研究。例如: 高压透射电子显微镜 (HTEM), 扫描电子显微镜 (SEM), 俄歇电子能谱仪 (AES), 电子探针显微分析仪 (EPMA), 离子探针质谱仪 (IPMS), 能散射 X 光分析仪 (EDXA), X 射线光电子谱仪 (ESCA), 和 X 光衍射仪等, 来研究金属切削过程中切屑的变形, 刀具的磨损和已加工表面质量, 甚至现在已发展到能用扫描电子显微镜在控制温度的条件下, 直接对切削过程进行动态观察研究。有关照片见图 1-3、图 1-4 和图 1-5。

与此同时, 加上各种性能的电子计算机, 录象机的应用, 和各种动态测力仪、光测弹性应变仪、红外测温技术、高速摄影机、快速落刀技术等进一步完善, 还有各种样件制备技术的发明和改进, 象超薄切片技术, 离子轰击减薄技术、复膜技术、复型技术、真空蒸镀膜技术等, 使国外从七十年代开始, 金属切削的研究, 已从宏观观察, 进入到微观的定性、定量分析研究, 从单项因素的研究进入到多项因素综合研究, 从静态研究进入到动态研究。

再由于新兴学科的相互渗透, 例如金属物理学、金属摩擦学、断裂力学、位错理论、电子显微学、激光技术、

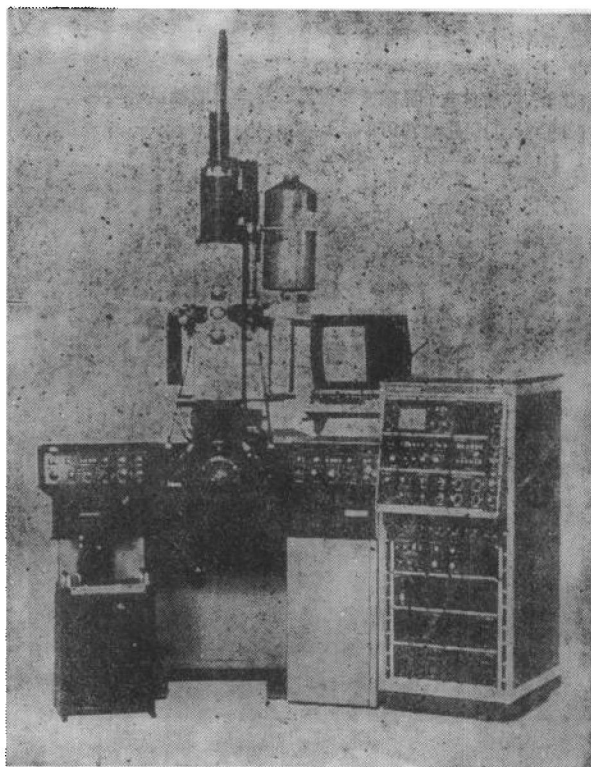


图 1-5 透射式电子显微镜

超声波技术、等离子技术、深冷技术、超塑性理论等应用于金属切削中,使各种有关切屑形成机理和刀具磨损机理方面的新观点层出不穷,从而大大推动了高性能刀具材料的研制和发展,改善了刀具的切削性能。

为满足数控机床、适应控制机床的要求,对刀具的寿命及其稳定性要求愈益强烈,因此,对工件材料的可切削性、刀具磨损和破损的动态检测以及切削力、切削温度、振动、加工表面质量及控制等方面的研究,愈来愈引起人们的重视,出现了利用直接或间接方法在加工中动态传感刀具磨损与破损信号的各种传感器;发展了根据工件和刀具材料已知的机械特性和热特性以及切削用量等来预测刀具寿命、切削力和切削温度的数学模型;产生了利用电子计算机存储切削数据的中心等,所有这些研究成果,现在都已达到了一定的可供实用的水平。

此外,对金属切削实验研究的方法发展也很快,为提高试验结果的科学性和准确性,采用了按数理统计原理设计的试验方法,例如因子设计法,响应曲面法、对角设计法等,为缩短实验的时间,节约人力和物力,研究和开发了各种快速的切削试验方法。

总之,金属切削的基础理论,经过近百年的研究,已经进入到一个综合、定量、微观研究的新阶段了。

金属切削的微观研究,将涉及到许多基本概念,第二章将首先介绍这方面的内容。第三章至第七章主要讨论刀具切削方面的内容;第八章至第十三章则讨论砂轮磨削领域的内容。

当然,本书所探索的只是切削领域很少一部分内容,需要微观研究的问题较多,这要金属切削的科研人员和工程技术人员共同为之奋斗的,本书仅作“抛砖引玉”吧。

参 考 文 献

- [1] 东升:《电子显微镜的世界》,科学出版社,1981年。
- [2] 《工具技术》,1979年1期。

第二章

金属切削微观研究的基本概念

应用先进的电子检测仪器,对金属切削中诸现象,进行分子级乃至原子级定性、定量研究的学科,称为金属切削的微观研究。

由于它涉及到金属物理学、金属摩擦学、位错理论、电子显微学等;多学科相互渗透,诸因素互相影响,多维的、动态的、综合的研究方式,乃是这一学科的突出特点。因此,有必要对有关基本概念进行介绍和讨论。

第一节 晶体结构

一、宏观与微观

在工程技术概念上,液体处于静止状态;从微观尺度上看,液体中有着剧烈的布朗运动。这是对同一液体,从宏观与微观两个角度上对比所产生的差异。这种差异在原子尺度上的一个方面,是用海森堡测不准原理来描述的,在观测任何物体的性质时,它是一个重要的约束。这一原理规定了发生在观测过程中的物体的最小的、不可避免的扰动。此原理的一个常用表达式为

$$\Delta x \times \Delta p \approx h \quad (2-1)$$

即测量某一物体位置时,固有的位置测不准值 Δx 和动量测不准值 Δp 的乘积,不能共同低于(大约)数值为 $6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 的普朗克常数 h 。在合理地处理原子尺度的现象时,这些测不准值具有极大的重要性。例如,对于一个运动着的电子,不能说它在某一瞬间处于某一确定的点上。因此,对电子采用一个表达式以体现其不可避免的位置测不准值是有利的。这类表达式中较为常见的一种形式是建立在德布罗意(de Broglie)方程的基础上的

$$\lambda = h/p \quad (2-2)$$

此处把波长 λ 和具有动量 p 的粒子联系在一起。这样,速度为 $0.727 \times 10^7 \text{ m/s}$ 的一个电子就可用波长 λ 来表征

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6.62 \times 10^{-34}}{(9.11 \times 10^{-31})(0.727 \times 10^7)} = 1.00 \times 10^{-10} \text{ m}$$

这样,用 λ 值的大小来表达电子就能很好地满足测不准原理的要求。

原子理论中,另一个基本概念就是能量的量子化。量子力学是建筑在微观世界的量子性(即不连续性)和微粒运动规律统计性这两个基本特征的基础之上的。假定一个能量子(一个单位原子过程中涉及一定的能包),在给定的反应中释放出能量,则此能量是以一定数值 E 的量子辐射出来的。 E 值是由单位原子过程决定的。这一辐射能量的相应频率 ν 可依据爱因斯坦(Einstein)方程与 E 联系起来,

$$E = h\nu \quad (2-3)$$

式中, E 为一个量子含有的能量, 单位为 J; ν 为频率, 单位为 Hz。此方程给出了辐射频率和构成辐射的能包即能量子值之间的关系。具有波长 $\lambda = 0.5 \times 10^{-6} \text{ m}$ 的绿光的频率

$$\nu = c/\lambda = \frac{3 \times 10^8}{0.5 \times 10^{-6}} = 6 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

式中 c 为光速。因而这一辐射的量子等于

$$E = h\nu = (6.62 \times 10^{-34})(6 \times 10^{14}) = 3.97 \times 10^{-19} \text{ J} = 2.48 \text{ eV}^*$$

由于 X 射线的波长大约是绿光波长的 $1/5000$, 所以一个 X 射线量子的能量大约是一个绿光量子能量的 5000 倍, 从而为 X 射线衍射分析技术奠定了基础。

以上我们从原子理论的基本原理出发, 阐述了宏观与微观的差异。就金属切削而言, 从宏观角度, 是连续介质力学基础; 从微观角度来看, 有着复杂的位错现象。1906 年以来金属切削的研究, 一些问题解释不清, 其原因就是没有从微观角度揭示问题的本质。

二、晶体结构中原子的键合

在具体研究金属切削有关问题之前, 我们先来讨论晶体结构中原子的键合。因为金属通常是排列成晶体结构的原子聚合体。金属的性质不仅取决于组成原子的本性, 而且也取决于原子聚合的方式。

在晶体结构中把金属或合金的原子结合在一起的力主要是电力(而不是磁力或重力)。虽然要定量地分析一个典型合金中原子的键合是十分复杂的, 甚至用近代量子力学也很困难, 但我们可以示意地描绘出存在于稳定的晶体结构中的引力(或斥力)的本性。

考虑一个假想的情况, 其中原子(或离子)在给定的晶体结构中保持其相对的位置, 只是原子间距增大了一个较大的倍数, 如果原子相距无穷远, 则原子间的作用力将等于零, 并且可令势能等于其参考值, 即零值。当原子和原子彼此开始靠近时, 引力首先变为主要因素。势能 W 是这些力 F' 在无穷远处和某个原子间距 r 之间所作的功的负值。

$$W = - \int_{\infty}^r F' dr \quad (2-4)$$

由于原子结构各不相同, 故在相互作用时, 不同原子之间吸引和排斥的情况也不相同, 这就构成了不同的键合机理。在一个指定的金属材料中的键合机理, 主要有四种: 金属键、共价键、离子键、范德瓦耳键(见图 2-1)。

金属键 当金属或合金的每一个原子都贡献出它们的价电子而形成由整个固体金属所共有的“电子云”时, 这种键合类型就是金属键。金属中的电传导和主要的热传导就是由这些价电子贯穿金属的自由运动造成的。由于带负电的电子云围绕着每个正离子, 所以构成了规则的三维晶体结构, 强烈的静电引力使金属结合在一起。金属键的特征是每一个正离子都是等同的, 因此, 金属在应力作用下可表现出塑性, 因为在某一局部地区, 一群正离子在破坏了它们的键合后滑移到一个新的位置上, 又重新键合起来。

范德瓦耳键 稀有气体和象甲烷(CH_4)那样的分子没有可供晶体键合所需要的价电子。但可由电荷极化的结果获得微弱的引力。极化是电学上中性的原子或分子在与邻近的原子或分子靠近时, 其正电荷及负电荷中心的分离。其邻近原子或分子也被极化。在相邻原子或分子之间所形成的微弱的电引力就是范德瓦耳力。范德瓦耳力只在低温时能够克服

* 电子伏特 eV 与焦耳比较是一个更简便的小单位, $1 \text{ eV} \approx 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$, 1 电子伏特是一个电子在电位差降低 1 伏特时所得的能量。

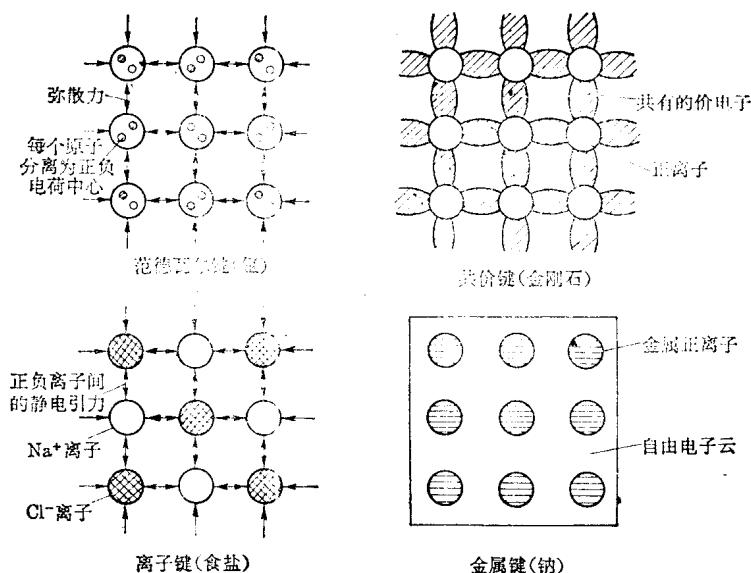


图 2-1 四种主要类型的键合图解

原子或分子热运动破坏键合的作用,因此,由这类键合所造成的所谓分子晶体是脆弱的,多数在低于 0°C 的温度就熔化。

离子键 由交替排列的正离子和负离子之间的静电引力产生的键合类型叫离子键。

在离子晶体中出现金属中那样的电子导电是不可能的,但是可由各个离子的运动导致微弱的离子导电。在承受应力时,离子晶体倾向于沿某原子面解理(破裂),而不象金属那样发生塑性变形。

共价键 许多具有三个或三个以上价电子的元素,在其晶体结构中是由电子共有所产生的力结合起来的,这种键合类型叫共价键。

这类有共价键的固体一般特征是具有高的硬度和低的导电性。

三、晶体结构的定量描述

在理想情况下,当价电子从金属原子中脱出时,就形成了对称的离子,由于这种离子的对称性,使金属倾向于形成高度对称,紧密排列的晶体结构。由于晶体结构是由多次重复的单元所组成,这种基本的离子或原子群,称为晶胞。

为了对金属中的晶体结构进行有效的研究,从而建立了一些必需的基本概念。

空间点阵 为了研究晶体中物质质点排列的规律性,需要进行抽象,将实际存在的原子、离子或原子集团等物质质点抽象为纯粹的几何点,而完全忽略它的物质性,这样抽象出的几何点称为阵点或结点,阵点或结点在空间周期性的规则排列称为空间点阵。

点阵常数 在空间点阵中我们可以选择一个小的平行六面体作为基本单元,平行六面体的大小和形状可以用三维空间的 a 、 b 、 c 三个单位矢量来表示,这样的平行六面体称作晶胞。整个空间点阵可以看作是由很多大小和形状完全相同的晶胞紧密地堆垛在一起而形成的。晶胞的三个棱边 a 、 b 、 c 和它们之间相互夹角 α 、 β 、 γ 称为晶胞的六个参数。 a 、 b 、 c 称为点阵常数。

在晶体中由物质质点所组成的平面称为晶面,物质质点所组成的直线称为晶向。如果

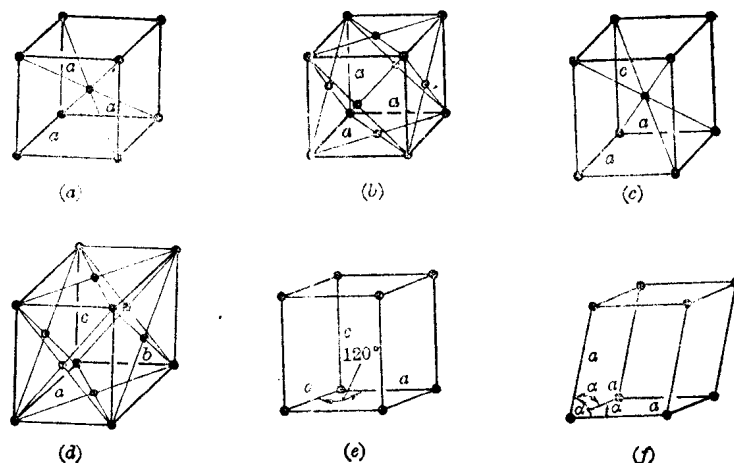


图 2-2 表明金属中六种比较重要的空间点阵的晶胞(a , b 及 c 代表点阵常数)

(a) 体心立方; (b) 面心立方; (c) 体心四方; (d) 面心正交; (e) 简单六方; (f) 斜方

此物质质点为原子, 则可分别称为原子面和原子列。

在晶体中各不同晶向和晶面上原子的(或离子、原子集团)排列的密度不一样, 这种结构

上的差异引起晶体在各个方向上的物理、化学、力学性能上存在差异, 这就是晶体的各向异性。在各种物理化学过程中(例如弹性变形、塑性变形、相变等), 不同的晶向和晶面的表现往往存在着差异, 而某些特殊的晶面(例如最密排面)往往起着特殊的作用, 为了区别和研究方便, 有必要用适当的指数符号来标定晶体中的晶面和晶向。

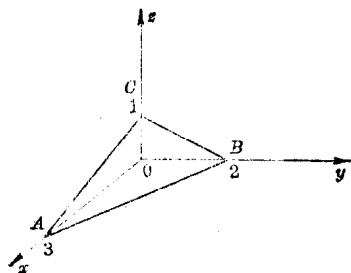


图 2-3 立方系晶面指数标定

晶面的标定方法如下:

(1) 在点阵中设立参考坐标系, 使坐标系的三个轴与晶胞的三个棱边重合, 以晶胞的点阵常数 a , b , c 分别为三个坐标轴的单位长度。

(2) 求出被标定晶面与 x , y , z 三个坐标轴相交所得截距, 为了避免零截距, 故所选坐标系原点一定要在被标定晶面之外, 而不能在被标定晶面上。

(3) 取各截距倒数。

(4) 将三个倒数通分后去掉分母, 三个分子数即是该晶面的晶面指数。

在晶体中有些晶面具有共同的特点, 其上原子排列和分布是完全相同的, 晶面间距也相同, 只是晶面的位向不同, 这样的几个等同晶面称为一个晶面族。晶面族符号记为 $\{ \}$ 。

例如 $\{100\}$ 包括 (100) , (010) , (001) 。

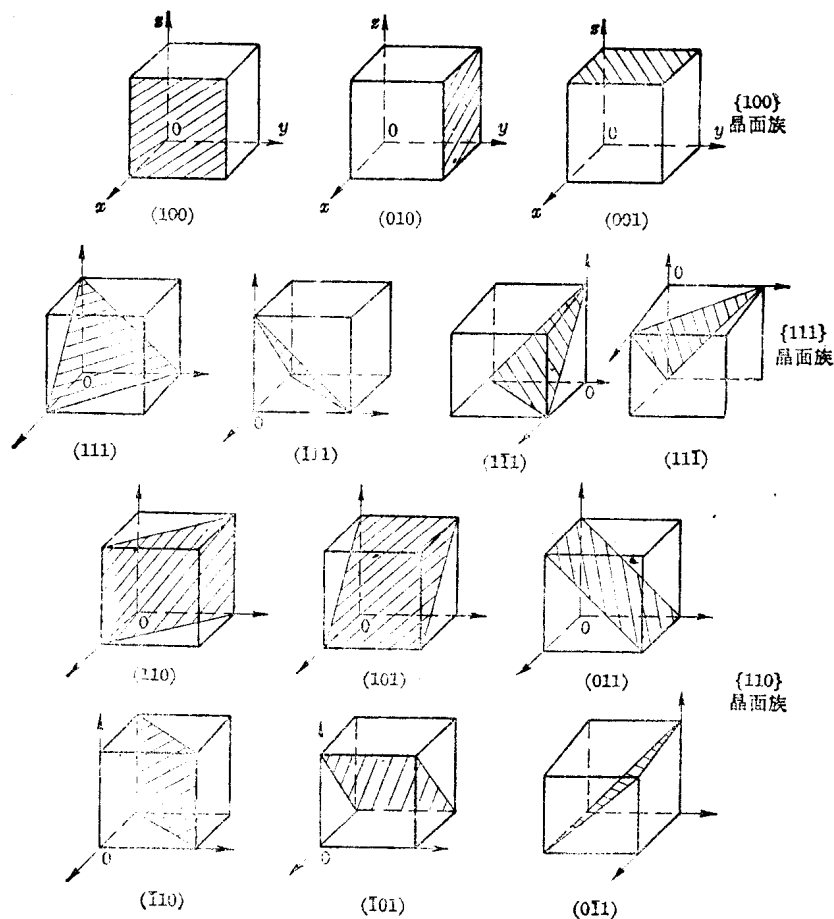
$\{110\}$ 包括 (110) , (101) , (011) , $(\bar{1}10)$, $(\bar{1}01)$, $(0\bar{1}1)$ 。

$\{111\}$ 包括 (111) , $(\bar{1}\bar{1}1)$, $(1\bar{1}\bar{1})$, $(\bar{1}1\bar{1})$ 。

这些晶面族如图 2-4 所示。

晶向指数的求法有两种:

一种是在坐标系中过原点做被标定晶向的平行线 L_0 , 取 L_0 上任一结点坐标 $[[xyz]]$, 将其化为三个互质整数的速比: $x:y:z=u:v:w$ 。则 $[uvw]$ 为晶向指数。


 图 2-4 $\{100\}$ 、 $\{110\}$ 、 $\{111\}$ 晶面族

另一种是在坐标系中写出晶向 L 上任意二结点的坐标 $[[x_1/y_1/z_1]]$ 和 $[[x_2/y_2/z_2]]$ ，将 $(x_1-x_2):(y_1-y_2):(z_1-z_2)$ 化为三个互质整数之连比即可得到晶向指数。

同样，在晶体结构中那些原子密度相同的等同晶向同属一个晶向族，用符号 $\langle uvw \rangle$ 表示。

第二节 金属的形变

上一节我们对晶体结构的综述，对金属形变的各个方面——包括机理、各向异性、和一般的宏观行为与各个晶体的变形之间的关系，提供了有用的见解。本节讨论金属材料的形变行为的实验规律，下一节讨论其微观机理。

一、弹性形变与塑性形变

形变分为弹性形变与塑性形变。

应力 当物体的一部分对其相邻部分施加力时，物体即处于一种应力状态之中。

弹性形变 在应力的作用下，晶体中的原子沿受力方向离开平衡位置，但外力不足以使原子完全脱离附近原子的约束，原子间的结合力则要求原子回到原来平衡位置，于是外力和

原子间力抗衡而维持相对静止状态, 当外力去除后, 原子间力把原子拉回原位而使形变消失。这种形变叫弹性形变。

塑性形变 在发生塑性变形时, 当加上切应力时, 相邻原子面相对切动, 切应力足够大时, 原子从原来平衡位置进入相邻的另一平衡位置, 当外力去除后, 切动了的原子面再不能回到原来位置, 于是留下永久变形。这就是塑性形变。

塑性形变机理有多种, 主要是: (1)滑移, (2)孪生, (3)晶界滑动, (4)扩散性蠕变。孪生一般在低温形变时发生, 但对滑移系少的如六角结构金属, 这种机理比较重要。晶界滑动和扩散性蠕变只在高温时才起作用。滑移是塑性形变最重要机理。

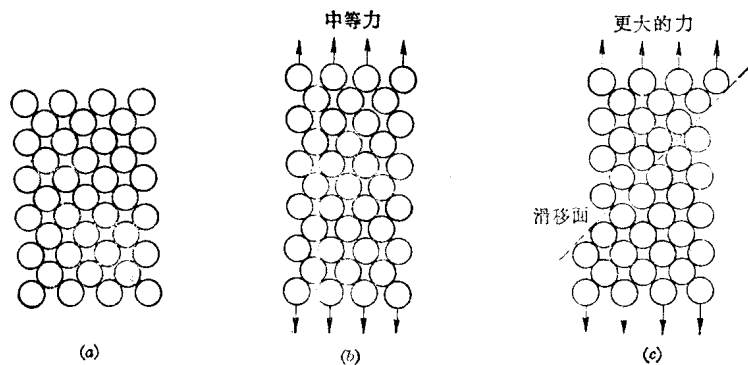


图 2-5 金属晶体中弹性变形与塑性变形本质区别的示意图

(a) 变形前的晶体结构; (b) 弹性变形相当于相邻原子的少量位移;

(c) 在塑性变形中某些原子移到全新的位置

二、滑移

滑移面 一个表面经抛光的单晶体拉伸时, 当应力超过屈服强度时, 在表面会出现和应力轴成一定角度的线, 经仔细分析知道这些线是一些小台阶。如果用肉眼仔细地研究, 看到

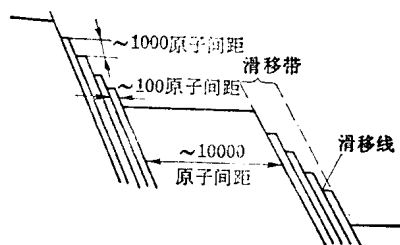


图 2-6 滑移线和滑移带示意图

在宏观的一个台阶中包含一组小台阶, 这些小台阶是互相平行的。从这些现象使我们知道晶体的塑性变形是晶体沿某些晶面和晶向相对滑动的结果, 滑动的晶面称为滑移面。滑动的方向称滑移方向。若晶体滑动距离是滑动方向原子间距的整数倍, 则滑动后并不破坏晶体排列的规则性, 这种塑性形变方式称为滑移。每一层晶面滑动后在表面出现的滑移痕迹——小台阶称为滑移线。互相靠近的一组小台阶在宏观上反映为一个大台阶, 称为滑移带。

图 2-6 是滑移带和滑移线构造的示意图。每一条滑移线所对应的台阶高度标志着某一滑移面的滑移量, 它的高度约为 1000 个原子间距。两滑移线之间为滑移层, 厚度约为 100 个原子间距。滑移带之间的距离约为 10000 个原子间距。从这也可看出, 晶体的滑移不是均匀分布的, 它只限于晶体内的有限部分进行, 在绝大部分地方没有或极少滑移。即使发生了大量的塑性变形, 在发生滑动的这组滑移面中也只有不到 1% 的晶面发生滑移。

三、滑移系

由一个滑移面和在面上的一个滑移方向组合称为滑移系。晶体中滑移面和滑移方向不