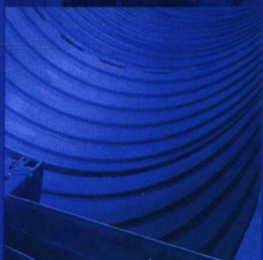




国际制造业先进技术译丛

磨削加工技术

(日) 庄司克雄 著
郭隐彪 王振忠 译



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS

TG58/7

2007

国际制造业先进技术译丛

磨削加工技术

(日) 庄司克雄 著
郭隐彪 王振忠 译

机械工业出版社

本书以磨削加工机理为重点,对磨削砂轮、磨削加工的表面粗糙度、磨削模型、磨削力、砂轮修整、磨损、磨削新技术等方面进行了重点阐述,形成相对完善的磨削理论,同时在内容上尽可能地磨削现象用模型化的方式表示,并采用大量理论实验的扫描电子显微镜(SEM)立体照片,深入地论述了磨削加工的本质,本书在磨削加工技术方面具有很高的理论价值和实际指导作用。

本书共8章,主要有磨削加工概要;磨削砂轮知识;磨削加工的表面粗糙度理论;磨削机理;磨削力理论;砂轮的修形和修锐;砂轮的磨损和再生作用;当前磨削新技术等。

This Chinese translation is based on the Japanese original: Kensaku Kakougaku by Katsuo Syoji

Published by Yokendo Co. Ltd.

Copyright© 2004, by Katsuo Syoji.

All rights reserved.

本书中文版由机械工业出版社独家出版发行。未经机械工业出版社的书面许可,不得以任何方式复制本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号:01-2007-1350。

图书在版编目(CIP)数据

磨削加工技术/(日)庄司克雄著;郭隐彪,王振忠译. —北京:机械工业出版社,2007.9

ISBN 978-7-111-21709-1

I. 磨… II. ①庄…②郭…③王… III. 磨削-基本知识 IV. TG58

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第093235号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:李建秀 版式设计:霍永明 责任校对:申春香

封面设计:鞠杨 责任印制:洪汉军

北京振兴源印务有限公司印刷厂印刷

2007年9月第1版第1次印刷

169mm×239mm·6.375印张·231千字

0001—4000册

标准书号:ISBN 978-7-111-21709-1

定价:28.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 68351729

封面无防伪标均为盗版

译丛序言

一、制造技术长盛永恒

先进制造技术是20世纪80年代提出的，它由机械制造技术发展而来，通常可以认为它是将机械、电子、信息、材料、能源和管理等方面的技术，进行交叉、融合和集成，综合应用于产品全生命周期的制造全过程，包括市场需求、产品设计、工艺设计、加工装配、检测、销售、使用、维修、报废处理、回收利用等，以实现优质、敏捷、高效、低耗、清洁生产，快速响应市场的需求。因此，当前的先进制造技术是以产品为中心，以光机电一体化机械制造技术为主体，以广义制造为手段，具有先进性和时代感。

制造技术是一个永恒的主题，与社会发展密切相关，是设想、概念、科学技术物化的基础和手段，是所有工业的支柱，是国家经济与国防实力的体现，是国家工业化的关键。现代制造技术是当前世界各国研究和发展的主题，特别是在市场经济高度发展的今天，它更占有十分重要的地位。

信息技术的发展并引入到制造技术，使制造技术产生了革命性的变化，出现了制造系统和制造科学。制造系统由物质流、能量流和信息流组成，物质流是本质，能量流是动力，信息流是控制；制造技术与系统论、方法论、信息论、控制论和协同论相结合就形成了新的制造学科。

制造技术的覆盖面极广，涉及到机械、电子、计算机、冶金、建筑、水利、电子、运载、农业以及化学、物理学、材料学、管理科学等领域。各个行业都需要制造业的支持，制造技术既有普遍性、基础性的一面，又有特殊性、专业性的一面，制造技术具有共性，又有个性。

我国的制造业涉及以下三方面的领域：

- 机械、电子制造业，包括机床、专用设备、交通运输工具、机械设备、电子通信设备、仪器等；
- 资源加工工业，包括石油化工、化学纤维、橡胶、塑料等；
- 轻纺工业，包括服装、纺织、皮革、印刷等。

目前世界先进制造技术沿着全球化、绿色化、高技术化、信息化、个性化和服务化、集群化六个方向发展，在加工技术上主要有超精密加工技术、纳米加工技术、数控加工技术、极限加工技术、绿色加工技术等，在制造模式上主要有自动化、集成化、柔性化、敏捷化、虚拟化、网络化、智能化、协作化和绿色化等。

二、图书交流渊源流长

近年来，国际间的交流与合作对制造业领域的发展、技术进步及重大关键技

IV

术的突破起到了积极的促进作用，制造业科技人员需要及时了解国外相关技术领域最新发展状况、成果取得情况及先进技术应用情况等。

必须看到，我国制造业与工业发达国家相比，仍存在较大差距。因此必须加强原始创新，在实践中继承和创新，学习国外的先进制造技术和经验、引进消化吸收创新，提高自主创新能力，形成自己的创新体系。

国家、地区间的学术、技术交流已有很长的历史，可以追溯到唐朝甚至更远一些，唐玄奘去印度取经可以说是一次典型的图书交流佳话。图书资料是一种传统、永恒、有效的学术、技术交流方式，早在20世纪初期，我国清代学者严复就翻译了英国学者赫胥黎所著的《天演论》，其后学者周建人翻译了英国学者达尔文所著的《物种起源》，对我国自然科学的发展起到了很大的推动作用。

图书是一种信息载体，图书是一个海洋，虽然现在已有网络、光盘、计算机等信息传输和储存手段，但图书更具有广泛性、适应性、系统性、持久性和经济性，看书总比在计算机上看资料要方便习惯，不同层次的要求可以参考不同层次的图书，不同职业的人员可以参考不同类型的技术图书，同时它具有比较长期的参考价值和收藏价值。当然，技术图书的交流具有时间上的滞后性，不够及时，翻译的质量也是个关键问题，需要及时、快速、高质量的出版工作支持。

机械工业出版社希望能够在先进制造技术的引进、消化、吸收、创新方面为广大读者做出贡献，为我国的制造业科技人员引进、纳新国外先进制造技术的出版资源，翻译出版国际上优秀的制造业先进技术著作，从而能够提升我国制造业的自主创新能力，引导和推进科研与实践水平的不断进步。

三、选译严谨质高面广

1) 精品重点高质 本套丛书作为我社的精品重点书，在内容、编辑、装帧设计等方面追求高质量，力求为读者奉献一套高品质的丛书。

2) 专家选译把关 本套丛书的选书、翻译工作均由国内相关专业的专家、教授、工程技术人员承担，充分保证了内容的先进性、适用性和翻译质量。

3) 引纳地区广泛 主要从制造业比较发达的国家引进一系列先进制造技术图书，组成一套“国际制造业先进技术译丛”。当然其他国家的优秀制造科技图书也在选择之内。

4) 内容先进丰富 在内容上应具有先进性、经典性、广泛性，应能代表相关专业的技术前沿，对生产实践有较强的指导、借鉴作用。本套丛书尽量涵盖制造业各行业，例如机械、材料、能源等，既包括对传统技术的改进，又包括新的设计方法、制造工艺等技术。

5) 读者层次面广 面对的读者对象主要是制造业企业、科研院所的专家、研究人员和工程技术人员，高等院校的教师和学生，可以按照不同层次和水平要求各取所需。

四、衷心感谢不吝指教

首先要感谢许多积极热心支持出版“国际制造业先进技术译丛”的专家学

者，积极推荐国外相关优秀图书，仔细评审外文原版书，推荐评审和翻译的知名专家，特别要感谢承担翻译工作的译者，对各位专家学者所付出的辛勤劳动表示深切敬意，同时要感谢国外各家出版社版权工作人员的热心支持。

本套丛书希望能对广大读者的工作提供切实的帮助，欢迎广大读者不吝指教，提出宝贵意见和建议。

机械工业出版社

前 言

磨削加工技术是现代精密超精密加工中的最重要加工手段之一，是制造精密设备的关键工序，是机械加工中不可缺少的重要组成部分。传统的磨削加工就是定义为精加工范畴，当今微纳米加工技术的发展更是离不开磨削新技术。精密磨削的关键设备是不可复制的，其技术的保密程度也是机械加工领域最高的，是世界各国科技投入较大、同时集中体现当代最新科学技术水平的一项技术。

本书作者日本东北大学工学部教授庄司克雄先生，长期从事精密超精密加工技术研究，特别是在精密超精密磨削加工上有很高的学术造诣。他是日本磨粒加工学会理事长，日本精密工学会东北支部长，日本机械学会东北支部长，日本精密加工研究会会长。本书是庄司克雄先生三十几年从事磨削技术研究的主要成果之一，希望通过此书能给我国从事这方面研究的科技人员、教师和学生提供一份比较齐全的参考资料。

本书以磨削加工机理为重点，结合笔者长期从事该领域研究经验的积累，对磨削砂轮、磨削加工的表面粗糙度、磨削模型、磨削力、砂轮修整、磨损、磨削新技术等方面进行了重点阐述，形成相对完善的磨削理论，同时在内容上尽可能地将磨削现象用模型化的方式表示，并采用大量理论实验的扫描电子显微镜 (SEM) 立体照片，相当深入地论述了磨削加工的本质，本书在磨削加工技术方面具有很高的理论价值和实际指导作用。

本书在翻译过程中得到成都精密光学工程中心李伟主任、许乔博士、吴遥工程师及厦门大学机电工程系徐雅珍老师、郑琳硕士的帮助，在此表示感谢！

虽然我们尽力做好翻译工作，但也难免有错误和遗漏之处，欢迎广大读者提出宝贵意见，给予帮助，以便这本书能够更忠实于原著。

译者 郭隐彪 王振忠

目 录

译丛序言

前言

第 1 章 磨削加工概要	1
1.1 磨削加工的定义及其地位	1
1.2 磨削加工的特点	3
1.2.1 磨削加工的特点概述	3
1.2.2 工具轨迹的复写性和加工精度	5
1.2.3 磨削加工的超高速化和超精密化	7
1.3 磨削加工的分类	8
1.3.1 平面磨削	8
1.3.2 外圆磨削	10
1.3.3 内圆磨削	12
1.3.4 切割磨削	12
第 2 章 磨削砂轮	16
2.1 磨削砂轮的三要素和五因素	16
2.2 磨粒	18
2.2.1 种类	18
2.2.2 粒度	21
2.2.3 体积比重	22
2.2.4 硬度	23
2.2.5 韧性	24
2.2.6 脆性	28
2.3 结合剂的种类和结合度	29
2.3.1 结合剂和砂轮的一般特性	29
2.3.2 结合剂的种类	31
2.3.3 结合度及其测试法	34
2.4 组织	40
2.4.1 组织号	40
2.4.2 组织的测定法	41
2.4.3 砂轮的组成图	42
2.5 砂轮的旋转破坏强度	46
2.5.1 应力分布	46
2.5.2 离心破坏强度	48
第 3 章 磨削加工的表面粗糙度	51
3.1 磨削加工表面粗糙度的形成理论	51

3.1.1 佐藤理论	51
3.1.2 小野理论	53
3.1.3 织冈理论	56
3.1.4 庄司理论	60
3.2 粗糙度理论公式中存在的诸多问题	69
3.2.1 极微小切入量情况下的磨削表面粗糙度	69
3.2.2 横向进给磨削的表面粗糙度	71
3.2.3 无火花磨削的表面粗糙度	73
3.2.4 磨粒切削刃前端角分布的影响	76
3.2.5 极限粗糙度	78
第4章 磨削机理	80
4.1 磨粒切入深度和磨粒切削长度	80
4.1.1 铣刀模型	80
4.1.2 脱落、钝化和磨削条件	81
4.1.3 横向进给磨削和斜面磨削	83
4.1.4 端面磨削	86
4.1.5 等价磨削厚度	87
4.2 基于三维砂轮模型的理论公式	88
4.2.1 有效切削刃	88
4.2.2 磨粒切入深度	91
4.2.3 磨粒切削长度	93
第5章 磨削力	96
5.1 磨削力的理论公式	96
5.1.1 磨削力的两个分力	96
5.1.2 C_p 值	98
5.1.3 两分力之比和磨削性能	99
5.1.4 磨削切割中的磨削力	100
5.2 磨削力比的尺寸效应	103
5.3 磨削力的测定	106
5.3.1 砂轮轴电动机的实际消耗动力	106
5.3.2 弹性环式测力计	107
5.3.3 压电型测力计	109
第6章 砂轮的修形和修锐	112
6.1 修形和修锐的意义	112
6.2 普通砂轮的修整	113
6.2.1 修整器和修整法	113
6.2.2 磨粒的修整特性	115
6.2.3 WA 砂轮的修整特性与结合度的关系	119
6.2.4 由于修锐形成的 WA 磨粒切削刃的图解分析	121
6.3 超硬磨粒砂轮的修形和修锐	122
6.3.1 对超硬磨粒砂轮的修形和修锐的基本认识	122
6.3.2 滚轮修整器的修形	123

6.3.3	杯形修整器	128
6.3.4	特殊修形法	140
第7章 砂轮的磨损和再生作用		143
7.1	砂轮的磨损和寿命	143
7.1.1	砂轮磨损的三种状态	143
7.1.2	磨削比	144
7.1.3	对软钢磨削的 CBN 砂轮的异常磨损	145
7.2	磨粒切削刃的再生作用	147
7.2.1	单颗粒磨削实验	147
7.2.2	磨粒切削刃的破碎力	149
7.2.3	超硬磨粒砂轮的再生作用	151
7.3	树脂结合剂金刚石砂轮磨粒的埋没现象	153
7.4	骨材磨粒的磨损	155
第8章 磨削新技术		157
8.1	缓进给磨削	157
8.1.1	缓进给磨削简介	157
8.1.2	缓进给磨削的磨削机理	157
8.1.3	缓进给磨削中的注意点	158
8.2	超高速磨削	161
8.2.1	超高速化的梦想	161
8.2.2	超高速磨削的开端	162
8.2.3	超高速磨床的开发	162
8.2.4	超高速化对 C_p 值的影响	164
8.2.5	超高速化对砂轮磨损的影响	167
8.2.6	在软钢磨削中对异常磨损的影响	168
8.3	超精密镜面磨削	170
8.3.1	超精密镜面磨削	170
8.3.2	树脂结合剂超微粒金刚石砂轮的超精密镜面磨削	171
8.3.3	针对磨粒埋没现象的对策	172
8.3.4	超微粒砂轮的超精密镜面磨削	176
8.3.5	对超微粒砂轮径向切入量的观点	178
8.3.6	超精密镜面磨削的注意点	179
8.4	非球面磨削	180
8.4.1	非球面镜片的重要性	180
8.4.2	一般的非球面磨削法	181
8.4.3	平行磨削法	182
8.4.4	用平行磨削法加工非球面玻璃镜片的例子	185
8.4.5	微小非球面金属铸模的平行磨削	186
8.4.6	自由曲面的平行磨削	187
8.5	平面珩磨	189
8.5.1	平面珩磨的概念	189
8.5.2	平面珩磨的加工实例	191

第 1 章 磨削加工概要

1.1 磨削加工的定义及其地位

磨削加工是使用磨粒进行加工（磨粒加工）方法中的一种。如图 1-1 所示，磨粒加工大致分为两种，一种如研磨或抛光，其磨粒处于游离状态的加工，另一种如砂轮或砂纸，其磨粒处于固定状态的加工。磨粒处于固定状态的加工（称为固定磨粒法）包括砂轮加工、砂纸加工、金刚石磨头加工或固定磨粒砂线切割加工等。在砂轮加工方面，使用高速旋转的砂轮进行加工时，筒形砂轮可以进行超精加工或珩磨，在生活中常见到的手砂轮研磨就属于这种。超精加工或珩磨是砂轮与工件相互作用往返和旋转运动的一种加工方法，但在作往返运动时容易使工件表面出现划痕。因此为了能得到比较高的耐磨性能，对于容易磨损的滚珠轴承面或发动机液压缸内壁的加工中使用研磨加工法。但是，在使用砂轮的加工方法中如果砂轮和工件之间的相对速度减小，加工效率也相应的变低了。在使用砂纸类工具的加工中，将使用砂带的加工方法称为砂带磨削。图 1-2 所示是砂带磨削加工的示意图。砂带磨削可以进行安全的宽幅度的切入磨削，同时也提高了加工效率。

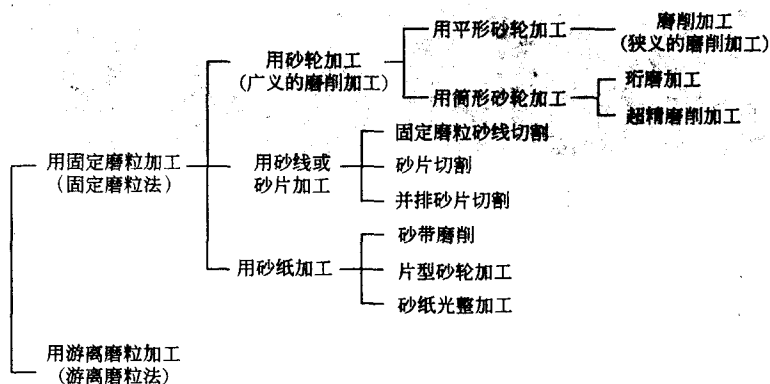


图 1-1 磨粒加工的分类

磨削加工，广义上是指使用固定磨粒工具进行的加工。但是在本书中，指的是使用高速旋转的平形砂轮进行的加工，即狭义的磨削加工。

磨削加工是使用高速旋转的平形砂轮（为了不引起概念的混乱也称为“砂轮”或“磨削砂轮”）进行加工，其主要机理是由微小切削刃（磨粒切削刃）对工件进行微小切削的加工，这一点与切削加工类似。但由于切屑非常的细小，所以在感觉上砂轮的作用是“磨”而不是“削”，本来应该称为“磨削”的加工，现在仍然一般在习惯上称为“研磨”。图 1-3 是 CBN 砂轮（BN170D100V5）对高速钢（SKH57）进行磨削后，电子显微镜（SEM）对磨粒切削刃上附着切屑的照片（图 4-10（4.2 节）也是同样的 SEM 切屑照片），其与车床切削得到的切屑一样，是波形切屑，所以这种磨削就不是研磨。由于有很多高硬度的非常细小的切削刃切出很多的切屑，因此称之为“磨削”。

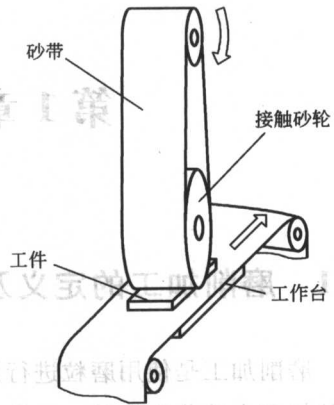


图 1-2 砂带磨削

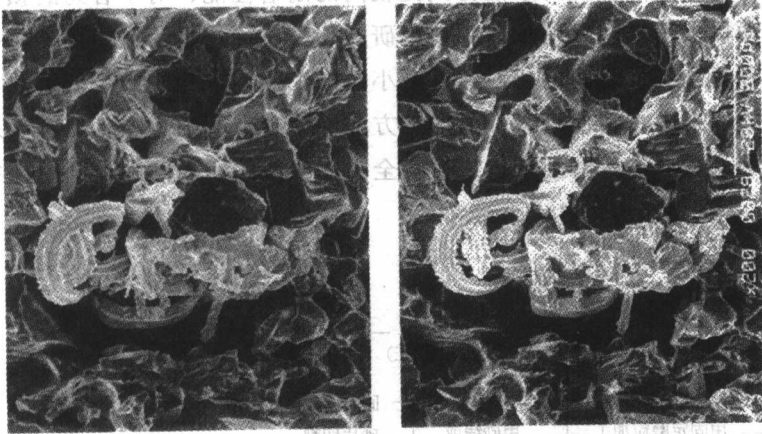


图 1-3 SKH57 切削的显微镜立体照片

（立体照片的使用方法：在一对立体照片的中间立一块 B5 纸张大小的两面白色的厚纸板，左眼看左边的图，右眼看右边的图，视线稍微远一点，左右两边的亮度和高度要相同，视角与图同处一水平线上就能看到立体效果。如果不方便，可以左右眼交替睁开闭上，也能看到立体效果。看习惯了的话，不用厚纸板也能看出立体效果）

磨削加工一直都属于精密加工的范畴。因此一般采用以下加工程序：先用切削加工对铸件进行粗加工，然后再用磨削对其进行精加工。而且磨削加工很容易

对高硬度的材料进行加工,对被切削过的钢材进行热处理后,大多采用磨削加工的方法对其尺寸或表面粗糙度等进行进一步的细致加工。

另一方面如后面所述(参照1.2.2节),磨削加工有形状精度高等特点,因此对玻璃等硬脆材料,使用金刚石砂轮对其进行磨削加工可确保其形状精度,而后再用研磨、抛光加工得到更高精度的镜面。

1.2 磨削加工的特点

1.2.1 磨削加工的特点概述

如上一节所述,磨削加工在基本原理上与车床切削或铣削等切削加工有类似之处。通常磨削加工与切削加工相比有以下一些特点。

(1) 砂轮切削刃是非常硬的矿物质磨粒 对于切削加工,原则上切削工具的硬度要比工件的硬度高。砂轮的切削刃(以下称为磨粒切削刃)是由硬度非常大的矿物质组成。目前被广泛使用的是金刚石磨粒和CBN磨粒(这里称为超硬磨粒)。一般的切削工具不能加工高硬度的工具钢和玻璃,也不能加工石材、半导体和陶瓷等硬脆性材料。

(2) 磨粒切削刃的前角有负角 在通常的切削加工过程中,切削刃的前角 γ (如图1-4a所示)为正角,但是由于铸件的破碎面使磨粒切削刃产生负角(如图1-4b所示)。所以对不能用于切削加工的硅或陶瓷等脆硬材料采用磨削加工,但对金属和同样有延展性的材料可以进行切削加工(笔者的观念是,如果使用切削刃的顶锥角很小的单晶金刚石刀具,把前角磨成 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$,那么像单晶硅那样非常脆的平时很难切削的材料,也可以被切出波形切屑,达到镜面加工的要求。在切削中,工具刀刃的前端与被切削材料的表面进行挤压,在其接触区域被切削材料出现剪切变形,产生波形切屑。但是在硬脆材料中,材料的张力比抗剪强度小,所以在剪切变形之前会出现张力破裂,不能形成波形切屑。但如果将工具刀刃的前角取负值,工具前端面的压缩力,静压成分变大,刀刃附件的张力成分变小,所以当切削厚度非常小时,出现剪切变形,形成波形切屑)。

(3) 砂轮是由很多非常细小的切削刃组成的多刃工具 磨削得到的切屑非常细小,一般磨削的磨削层厚度(如图1-4a所示)从 $1 \sim 10\mu\text{m}$,精密磨削的磨削层厚度还要小。因此,使用磨削加工得到的精度和表面粗糙度要优于切削加工。

(4) 磨粒切削的速度非常快 在一般磨削中,砂轮的线速度是 $1800\text{m}/\text{min}$ ($30\text{m}/\text{s}$),比车床等切削加工快 $5 \sim 10$ 倍(一般在外圆磨削加工中,将砂轮线速

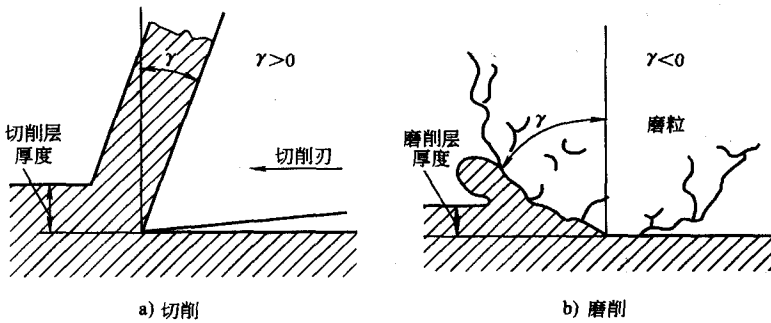


图 1-4 切削和磨削工具前角的比较

度设定为 45m/s ，但在大部分的磨床中砂轮线速度是 1800m/min (30m/s)。这由砂轮的转数决定，所以如果磨床使用指定直径以外的砂轮是非常危险的，也是绝对不允许的)。现阶段超高速磨削大约是此速度的 10 倍，即可以实现砂轮线速度为 $150 \sim 300\text{m/s}$ 的超高速磨削。因此使用磨削技术，加工像橡胶那样弹性很大的材料成为可能；即使得到的每个切屑都非常的细小，也能提高整体的加工效率。

(5) 磨粒切削刃的自锐作用 磨粒的硬度很高但同时也很脆。因此，前端磨损的磨粒切削刃由于受到过大的磨削力的作用，破碎而生成新的锐利的切削刃，这就是切削刃的自锐作用。也称为磨粒切削刃的自我再生作用 [或者称自锐作用]。充分利用磨粒切削刃的自锐作用，能有效延长砂轮的寿命。

(6) 磨削易于对砂轮进行修形和修锐 例如，在安装铣刀时会有偏心误差，再次进行加工时要调整就很难。但是，砂轮的磨粒是一个独立体，有很高的硬度和脆性，而且如果起固定作用的结合剂也是脆性较高的像树脂或软金属之类的材料，在其工作时就很容易使被磨损钝化的切削刃再生成新的尖锐切削刃（在切削工具中像金刚石车刀那样非常坚硬的工具，由于其切削刃在磨损的同时不容易再生和修形，因此这种工具的成本很高，所以不能对氮化硅或碳化硅那样高硬度的陶瓷进行切削；而磨削砂轮是因为磨粒切削刃有很高的硬度，但同时又保持有一定的破碎性，使磨粒切削刃的整修和修锐变得容易。所以针对金刚石砂轮，磨粒脆性低的特点，结合剂使用像铜合金那样硬度比较低的金属或树脂结合剂，这样对玻璃等脆性高的材料（针对以上所说的结合剂而言）进行加工时，结合剂的粘结度被破坏，磨粒脱落，使其在加工的同时又对金刚石砂轮进行修形成为可能）。

(7) 在断续切削中的磨削力变化非常小 以一个磨粒切削刃来分析，砂轮旋转一周的断续磨削与铣刀的切削加工类似，这对减少切削刃的磨损是非常有利

的。但是，在磨削加工的任意瞬间，同时进行切削的切削刃数非常多，断续切削加工的磨削力（在磨削场合称为磨削力或磨削抵抗）变化非常小，像车削那样的连续切削则完全不变。这一点对实现高精度加工非常重要。

(8) 磨削点的温度很高 要去除单位体积的切屑需要一定的能量，如图 1-5 所示切屑的尺寸越小，需要的能量越大。因此，使用高速切削切出微小的切屑，在磨削加工中会不可避免地出现加工表面烧伤和划痕等现象，所以必须使用大量的水溶性磨削液进行冷却。

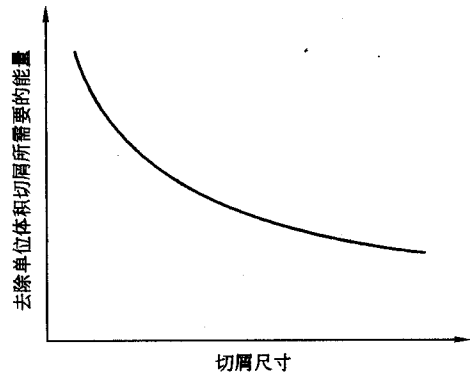


图 1-5 去除单位体积切屑所需要的能量与切屑尺寸的关系

1.2.2 工具轨迹的复写性和加工精度

机械加工的基本原理是工件复写工具的轨迹，其加工精度受母性加工原则的支配。但是，在实际加工中，这种复写性有着微妙的不同，即要考虑工具与工件间距离和加工速度的关系，如图 1-6 所示，由于其加工方法的不同，这种关系也就不同。在这里加工速度也就是单位时间、单位加工面积的加工量。

图 1-6 中的 A 表示伴随着工具与工件之间距离的增加，加工速度急剧减小的加工法，其工具轨迹的复写精度高。例如切削，如果工具在工件上的行走轨迹偏离了，由于工具本身的弹性变形或工具伴随工件本身支持性的弹性变形而回复，加工速度也就急剧的减小。所以无论在切削或磨削加工中，工件与工具距离的相对变动都敏感的反应在加工速度上。

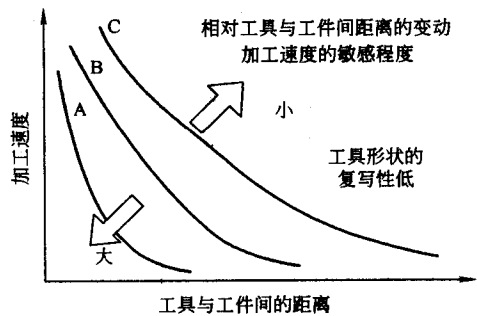


图 1-6 工具运动轨迹的复写性

与上述相反，C 是针对工具与工件之间距离的变化，加工速度反应迟钝的加工法，其工具轨迹的复写精度低。例如在放电加工和电解加工中，工具电极和工件之间距离的变化对加工速度的影响不大。因此工具的形状和运动轨迹很难被正确的复写，在磨粒加工中抛光等加工就属于这一类。要想达到高精度的加工，必

须选择工具轨迹复写精度高的加工方法，当然在复写精度高的加工中高精度的工作机械也是不可缺少的，其代表有金刚石切削等。

除了以上因素，工具的实际刚性对工具轨迹的复写精度也有影响，因此在磨粒加工方面，虽然磨粒的支持刚性非常小，但不得不考虑。现在，以磨粒的支持刚性为 k_a 、 k_b ($k_a > k_b$) 的两种不同加工为例。加工时磨粒受力从 σ_1 到 σ_2 之间磨粒前端出现形变 $\Delta\varepsilon$ ，两种不同加工的形变分别为 $\Delta\varepsilon_a$ 、 $\Delta\varepsilon_b$ ，如图 1-7 所示。由此得出在支持刚性 k 越大的加工中 $\Delta\varepsilon$ 越小， k 与 $\Delta\varepsilon$ 成反比。所以给硬度不同的复合材料加工时就会出现加工段差。为了解决复合材料的加工段差，应选择磨粒支持刚性大的加工法。

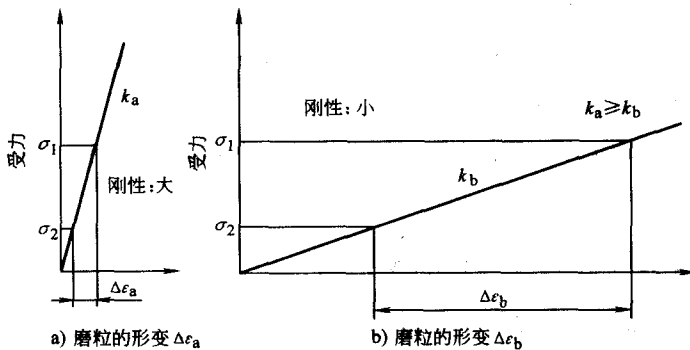


图 1-7 支持刚性和形变

另一方面从表面粗糙度的观点出发，其与磨粒的支持刚性相比完全相反。如图 1-8 所示，磨粒切削刃的磨削刚性（针对砂轮径向的切入量称为磨削力的法向分力的变化率。因与刚性的关系成正比故称其为磨削刚性。在这里为了简单所以用线性来表示两者的关系）由 k_c 表示，磨粒的受力 σ 和背吃刀量 δ 之间的关系为

$$\sigma = k_c \delta \quad (1-1)$$

现在，假设简化的磨粒支持系统为动态刚性系数为 k_d 的线性系统，磨粒中心的深度为 δ_0 ，其关系为

$$\sigma = k_d (\delta_0 - \delta) \quad (1-2)$$

因此，公式 (1-1) 和公式 (1-2) 合并得出

$$\delta = \left(\frac{k_d}{k_c + k_d} \right) \delta_0 \quad (1-3)$$

很显然，磨粒背吃刀量 δ 与表面粗糙度成比例关系，由公式 (1-3) 可以得出磨削刚性 k_c 较大且系统的动态刚性 k_d 较小时，表面粗糙度就比较小。因此，由于

砂轮和抛光机表面有突出的磨粒存在，加工表面有划痕的现象也就不难理解了。即使使砂轮的棱角不太锐利，只要减小磨粒的支持刚性，划痕的发生几率也就相应的减小了。

以工具轨迹复写为基础的加工，要保证形状精度与保证表面精度的加工要求完全相反。但是近年来，如在对非球面的加工中，要求同时满足这两种要求的场合越来越多。在这种场合下，要追求形状精度就必须保证工具及工具的支持刚性要高，要确保表面精度就必须要求加工机械达到能排除非常微小振动的要求。但不幸的是不能完全同时达到这两种要求。因为要确

保表面精度减小振动，就必须控制工具的支持刚性，在这种情况下，如果改变砂轮结合剂的材质和气孔率，就可以自由控制工具的刚性。今后随着对超精密加工需要的增多，使用磨削加工和抛光比使用切削加工更加有利。

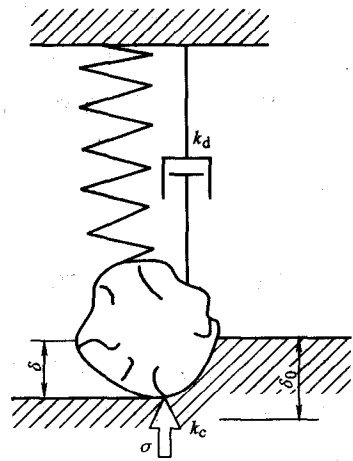


图 1-8 工具支持系统中的动态刚性 k_d 和磨削刚性 k_c 。

1.2.3 磨削加工的超高速化和超精密化

磨削加工有很多特征都处于切削加工和研磨加工之间。从一般加工的顺序来看，首先使用切削对材料进行粗加工，然后用磨削加工对其进行修形，最后用研磨得到镜面效果。从加工效率来看，切削加工最优越，但要想得到镜面加工的效果，使用研磨加工最适合。但是，从另一个方面来看，相对高硬度材料的切削加工来说，磨削加工的加工效率、加工形状精度显得相对较低（但是，与平面和球面有关的加工例外），因此没能突出其处于切削与研磨之间的加工优势。所以必须改善磨削加工效率，使其适应从切削到研磨得到镜面加工的加工程序，不仅能实现高效率的加工，也使以前不能达到的加工要求成为可能。

为了实现超高速磨削和超精密磨削，也就是要普及超硬磨粒的使用。即在磨削加工方面提高砂轮的线速度，使磨削效率的提高成为可能。超硬磨粒的出现也使砂轮的旋转速度提高，实现了线速度在 200m/s 以上的超高速磨削。另一方面，伴随着磨粒切削刃的尺寸越来越小，得到的切削尺寸也变得非常细小，使其进行镜面加工成为可能。磨粒的更新在磨削方面非常重要，砂轮的切削刃如果很容易被磨损，磨削就不能继续进行（在超精密加工中，砂轮的线速度乃至于砂