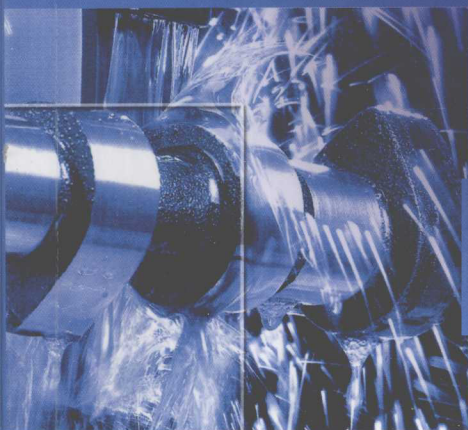


机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

超高速

磨削技术



■ 盛晓敏 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国家科技支撑计划“汽车关键零部件高效精密加工装备与工艺”项目资助
国家科技重大专项“高档数控机床与基础装备”、“难加工材料高速/超高速磨削工艺研究”项目资助
机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

超高速磨削技术

盛晓敏 宓海青 谢桂芝
尚振涛 郭 力 陈 涛 编 著
陈根余 胡惜时 张见明



机械工业出版社

本书是超高速磨削技术领域的最新科技专著。全书共分为九章，主要包括：超高速磨削技术的基本概念和技术体系，超高速磨削过程及机理，国际上先进的高速/超高速磨削方法与关键技术，超高速磨削用砂轮及其修整技术，高速/超高速磨削条件下磨削液的作用机理、类型和注入方式，不同材料高速/超高速磨削的磨削方法与工艺，超高速磨削装备与关键功能部件的关键技术与设计方法，几种典型超高速磨床的介绍，高速/超高速磨床的结构动力学设计，高速磨削科学数据共享网的结构、特点与应用。

本书可供磨削技术与装备的研究与开发人员、高等学校机械设计制造与自动化专业本科生和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

超高速磨削技术/盛晓敏等编著. —北京: 机械工业出版社, 2010. 5

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目,
ISBN 978-7-111-28778-0

I. ①超… II. ①盛… III. ①磨削 IV. ①TG58

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 063933 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 商红云 责任编辑: 蔡开颖 版式设计: 张世琴
责任校对: 张晓蓉 封面设计: 张 静 责任印制: 乔 宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2010 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm · 19.25 印张 · 476 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-28778-0

定价: 36.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010)68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010)88379649

读者服务部: (010)68993821

封面无防伪标均为盗版

序

超高速磨削是当今先进制造领域最为引人关注的高效加工技术之一。超高速磨削在欧洲、日本和美国等发达国家被誉为“现代磨削技术的最高峰”。日本先端技术研究学会把超高速加工列为五大现代制造技术之一。国际生产工程研究学会(CIRP)将超高速磨削技术确定为面向21世纪的中心研究方向之一。我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要》将超高速加工列入国家重点支持的技术与产业领域。

本书作者及作者单位湖南大学国家高效磨削工程技术研究中心,针对我国高效率高质量加工的需求,紧紧围绕超高速磨削技术的研究,通过多年的科技攻关,在超高速磨削技术领域取得了一批较高水平的科研成果。

本书以超高速磨削关键技术和装备为主线,全面系统地论述了超高速磨削的技术内涵、机理、方法、工艺、设计、装备与功能部件等有关方面的基础理论和关键技术。

我由衷地希望通过本书的出版,为着力解决我国高速高效数控磨床的科学与技术问题,增强我国高档数控机床的技术创新能力和参与推进其产业化的快速发展提供技术支撑。

中国工程院院士(磨削技术领域)

周勤元

前言

以超高速磨削为代表的高速磨削技术能极大地提高生产率和产品质量，降低成本，实现难加工材料和复杂型面的精加工，将成为 21 世纪制造工艺与装备工业中最具代表性和突破性的技术。高速高效数控磨削装备将以高效率、高精度、低能耗和高自动化等技术优势在 21 世纪制造业的竞争中发挥着至关重要的作用。

在超高速磨削技术及装备研究方向，国内尚没有形成完整、系统的研究体系。为推进我国超高速磨削技术的进步，提升我国高档数控磨削装备的国际竞争力，由湖南大学国家高效磨削工程技术研究中心盛晓敏教授牵头，编著了这本《超高速磨削技术》。

本书集聚了湖南大学近年来在超高速磨削技术与装备领域的科技成果，同时参考了国内外先进的超高速磨削资料，编著出版了这本书。

本书由湖南大学盛晓敏等编著，第 1 章由盛晓敏编著；第 2 章由谢桂芝编著；第 3 章由郭力、盛晓敏、宓海青编著；第 4 章由尚振涛、陈根余编著；第 5 章由尚振涛编著；第 6 章由谢桂芝、盛晓敏、陈涛编著；第 7 章由宓海青、郭力、盛晓敏、胡惜时编著；第 8 章由张见明、盛晓敏编著；第 9 章由盛晓敏编著，全书由盛晓敏统稿。

本书得到资嘉磊、唐昆、吴耀、赵小青、姜琼、贺兵、张国华、周水庭、张新玲、张梦华等科技人员的大力支持，在此表示衷心的感谢。

本书的编著，得到机械工业出版社高水平学术专著出版基金的大力支持。

本书承蒙中国工程院周勤之院士作序和推荐，在此表示衷心感谢。

本书是磨削技术与装备的研究与开发人员、高等学校机械设计制造与自动化专业本科生和研究生的重要参考书。

对本书的错误不足之处，敬请广大读者批评指正。

盛晓敏

本书主要符号

a	磨粒特征尺寸, 热扩散率	F_l^*	横向裂纹的临界载荷
a_{ds}	动态切入加工表面的深度	F_m^*	中央/径向裂纹的临界载荷
a_{eq}	当量磨削层厚度	F_n	法向磨削力, 动态磨削力幅值
a_{min}	临界磨削厚度	F'_n	单位磨削宽度法向磨削力
a_p	磨削深度	F_t	切向磨削力
a_s	砂轮切入加工表面的深度	F'_t	单位磨削宽度切向磨削力
A	单位体积磨屑表面积	F_x	x 向磨削力
A_f	裂纹镜像表面积	F_z	z 向磨削力
B	磨削宽度	G	Griffith 裂纹扩展参数, 磨削比
c	比热容	G_c	裂纹能量释放率
c_{gw}	和砂轮形貌相关的常数	h_{max}	最大未变形磨屑厚度
C	单位面积平均有效磨刃数	H	材料的硬度
d_s	砂轮直径	k_c	接触刚度
d_{se}	当量砂轮直径	k_w	磨损刚度
d_w	工件直径	K	传热系数
e_s	比磨削能	K_{IC}	断裂韧度
E	弹性模量	l_c	接触弧长(长度)
E_f	裂纹扩展所需能量	l_k	动态接触长度
f	单位面积磨削力, 振动频率	N	单位体积包含的磨粒数
f_n	单位面积法向磨削力	N_d	单位面积动态有效磨刃数
f_t	单位面积切向磨削力	N_t	单位长度静态有效磨削刃数
F	磨削力	P_m	单位宽度磨削功率
F_{gn}	单颗磨粒法向磨削力	q	热通量, 热流密度
F_{gnc}	单颗磨粒的法向切削变形力	Q	单颗磨粒的切屑横断面面积
F_{gns}	单颗磨粒法向摩擦力	Q_{ch}	传入磨屑的热量
F_{gt}	单颗磨粒切向磨削力	Q_f	传入磨削液的热量
F_{gtc}	单颗磨粒的切向切削变形力	Q_s	传入砂轮的热量
F_{gts}	摩擦引起的切向力		

Q_u	辐射的热量	γ^*	工件表面波纹度幅值
Q_w	传入工件的热量	Z_w	磨除率
r_c	工程陶瓷的磨屑尺寸	Z'_w	比磨除率
R	圆弧热源半径	γ	材料的断裂表面能
S_w	单位时间单位宽度内磨粒耕犁面积	γ_g	磨粒的几何特性
t_c	去除某个接触层所需的时间	ε	热量分配系数
T	磨削区工件的表面温度	θ	磨粒锥顶半角
v	热源移动速度	μ_c	单位体积磨屑动能
v_c	磨屑飞出速度	μ_i	单位体积断裂能
v_s	砂轮线速度	ρ	密度
v_w	工作台速度, 工件进给速度	φ	法向力与工作台垂直方向的夹角
W_z	波纹度平均波幅值	ϕ	热源及其移动方向的夹角
γ	砂轮中心的振动位移	ϕ_i	圆弧热源中线热源的位置

目 录

序

前言

本书主要符号

第1章 绪论	1
1.1 超高速磨削技术的定义	1
1.2 超高速磨削技术的提出	1
1.3 超高速磨削机理	2
1.4 超高速磨削的重要性	2
1.5 超高速磨削的方法与类别	4
1.6 超高速磨削的技术内涵	6
1.7 超高速磨削技术的发展现状与趋势	10
1.8 实现超高速磨削的主要技术途径	15
1.9 超高速磨削技术的体系	15
参考文献	24
第2章 磨削机理	25
2.1 磨削过程及机理	25
2.2 磨削要素	29
2.3 磨削用量	31
2.4 磨削力和能	33
2.5 磨削温度	36
参考文献	43
第3章 高速/超高速磨削方法	45
3.1 超高速磨削	45
3.2 高效深切磨削	48
3.3 快速点磨削	63
3.4 切点跟踪磨削	70
3.5 非圆轮廓的高速精密磨削	82
参考文献	85
第4章 超高速磨削用砂轮及其修整技术	86
4.1 超高速砂轮的磨料	86
4.2 超高速砂轮的结构形式	92
4.3 超高速砂轮的优化设计	98
4.4 超高速超硬磨料砂轮修整技术	102
参考文献	137

第5章 磨削液	140
5.1 磨削液的作用机理和类型	140
5.2 磨削液添加剂	143
5.3 超硬磨料砂轮磨削液的选择	145
5.4 高速/超高速磨削时磨削液的注入.....	146
5.5 磨削液技术的发展特点与趋势	150
参考文献.....	152
第6章 典型材料高速/超高速磨削	153
6.1 工程陶瓷的高速深磨	153
6.2 钛合金的超高速磨削	174
6.3 40Cr 钢的高速/超高速磨削	183
6.4 45 钢的高速/超高速磨削	189
参考文献.....	194
第7章 超高速磨削装备与关键功能部件	197
7.1 超高速磨削对装备的基本要求	197
7.2 几种典型的超高速磨削装备	198
7.3 超高速磨床关键功能部件	217
参考文献.....	236
第8章 高速/超高速磨床的数字化设计	237
8.1 高效磨床的数字化设计	237
8.2 高速磨床的动态分析方法及结构优化设计	238
8.3 高速磨床 CAE 设计	269
8.4 高速/超高速磨床的机械安全设计.....	271
8.5 高效磨床数字化设计新技术和制造模式	279
参考文献.....	283
第9章 高速磨削科学数据共享网	284
9.1 概述	284
9.2 国内外高速磨削数据库现状	284
9.3 数据库共享网关键技术	286
9.4 磨削数据共享平台的体系结构设计	287
9.5 磨削数据共享平台的数据格式	294
9.6 共享网功能与特点	295
9.7 共享网开发环境和共享平台服务	296
9.8 共享网管理	297
参考文献.....	299

第 1 章 绪 论

本章摘要：本章阐述了超高速磨削研究的背景及重要性、超高速磨削技术的定义与内涵，分析了超高速磨削的优越性与特点，论述了实现超高速磨削的主要技术途径，以及高速/超高速磨削技术的发展现状与趋势，提出了超高速磨削的技术体系。

1.1 超高速磨削技术的定义

超高速磨削是通过提高砂轮线速度（即磨削速度）来达到提高金属磨除率和质量的工艺方法，磨削加工按砂轮线速度 v_s 的高低可分为普通磨削（ $v_s = 30 \sim 40\text{m/s}$ ）和高速磨削（ $v_s > 45\text{m/s}$ ）两类。为了与 20 世纪 80 年代以前 v_s 不超过 $80 \sim 120\text{m/s}$ 的一般高速磨削相区别，通常将速度为普通磨削速度 5 倍以上（ $v_s = 150\text{m/s}$ ）的高速磨削称为超高速磨削，英文为 Super High Speed Grinding 或 Very High Speed Grinding。

超高速磨削技术是一种高效而经济地生产出高质量零件的现代加工技术，是应用高效率、高精度、高自动化、高柔性的磨削装备，提高磨削的进给速度，增加单位时间金属比磨除率 Z'_w 和金属磨除率 Z_w ，使磨除率较普通磨削有较大提高，达到和车削、铣削那样高甚至更高的金属磨除率，以最大限度地提高工件加工效率、加工精度和加工表面质量的先进制造技术。

1.2 超高速磨削技术的提出

超高速磨削理论是基于德国切削物理学家萨洛蒙 (Carl Salomon) 提出的超高速切削理论。萨洛蒙认为：与普通切削速度范围内切削温度随切削速度的增大而升高不同，当切削速度增大至与工件材料的种类有关的某一临界速度后，随着切削速度的增大，切削温度与切削力反而降低。他的思想给了后人非常重要的启示：如果能在大于临界速度范围内工作，则有可能采用现有刀具进行高速切削，大幅度地提高机床的生产率。在高磨除率条件下，随着砂轮线速度 v_s 增大，磨削力在 $v_s = 100\text{m/s}$ 前后的某个区间可能出现陡降（约降低 50%）。这种趋势随着磨除率的提高而越加明显，且当砂轮达到超高速磨削状态后，工件表面温度出现回落趋势。

超高速磨削中的许多现象可通过引入最大磨屑厚度 $h_{\max}$ 这一参数来解释。在保持其他参数不变的条件下，随着 v_s 的大幅度提高，单位时间内参与切削的磨粒数增加，每个磨粒切下的最大磨屑厚度 $h_{\max}$ 变小，磨屑变得非常细薄。实验表明：其截面积仅为普通磨削条件下的几十分之一，这导致每个磨粒承受的磨削力大大变小，总磨削力降低。若通过调整参数使最大磨屑厚度保持不变，由于单位时间内参与切削的磨粒数增加，磨除的磨屑增多，磨削效率会大大提高。

著名的萨洛蒙 (Salomon) 曲线，创造性地预言了超越 Taylor 切削方程式的非切削工作区

域的存在, 提出如能够大幅度提高切削速度, 就可以越过切削过程产生的高温死谷而使刀具在超高速区进行高速切削(如图 1-1 中, 当磨削速度超过 v_g 后), 从而大幅度减少切削工时, 成倍地提高机床生产率。他的预言为后来的高速甚至超高速磨削的发展指明了方向, 对于超高速磨削技术的实用化也起到了直接的推动作用。Salomon 高速切削加工理论示意图如图 1-2 所示。

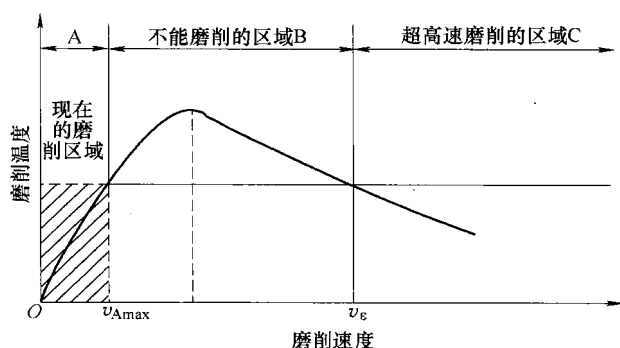


图 1-1 超高速磨削概念示意图

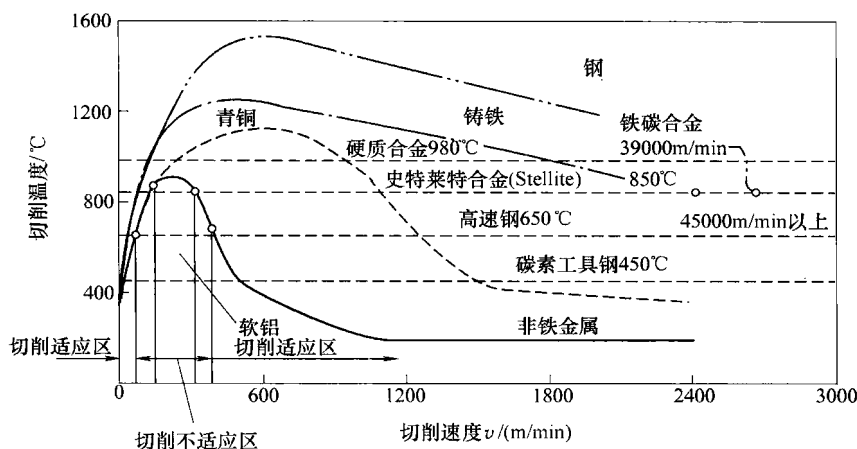


图 1-2 Salomon 高速切削加工理论示意图

1.3 超高速磨削机理

在超高速磨削加工过程中, 在保持其他参数不变的条件下, 随着砂轮速度的大幅度提高, 单位时间内磨削区的磨粒数增加, 每个磨粒切下的磨屑厚度变小, 则超高速磨削时每颗磨粒切削厚度变薄。这就导致每个磨粒承受的磨削力大大变小, 总磨削力也大大降低。超高速磨削时, 由于磨削速度很高, 单个磨屑的形成时间极短。在极短的时间内完成的磨屑的高应变率(可近似认为等于磨削速度)形成过程与普通磨削有很大的差别, 表现为工件表面的弹性变形层变浅, 磨削沟痕两侧因塑性流动而形成的隆起高度变小, 磨屑形成过程中的耕犁和滑擦距离变小, 工件表面层硬化及残余应力倾向减小。此外, 超高速磨削时磨粒在磨削区上的移动速度和工件的进给速度均大大加快, 加上应变率响应温度滞后的影响, 会使工件表面磨削温度有所降低, 因而能越过容易发生磨削烧伤的区域, 而极大扩展了磨削工艺参数的应用范围。

1.4 超高速磨削的重要性

超高速磨削是当今先进制造领域最为引人关注的高效加工技术之一, 超高速磨削机理的

研究受到国内外学者的广泛关注和高度重视,是国内外磨削界的研究前沿和重点研究课题。超高速磨削在欧洲、日本和美国等发达国家发展很快,德国著名磨削专家 T. Tawakoli 博士将其誉为“现代磨削技术的最高峰”。我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要》将超高速加工列入国家重点支持的技术与产业领域。日本先端技术研究学会把超高速加工列为五大现代制造技术之一。国际生产工程研究学会(CIRP)将超高速磨削技术确定为面向 21 世纪的中心研究方向之一。

超高速磨削是磨削技术的革命性飞跃。超高速磨削突破了传统磨削的概念,不仅有高的金属磨除率,还能获得很好的工件表面粗糙度和精度,使磨削工艺扩大了使用范围,成为一种有能力和车削、铣削等加工方法相竞争的高效加工工艺。实验和科学研究证实:大幅度提高切削速度,就可以越过切削过程产生的高温死谷而使刀具在超高速区进行高速切削,从而大幅度减少切削工时,成倍地提高机床生产率。超高速磨削不仅对高塑性和难磨材料具有良好的磨削表现,而且能够高效率地对硬脆材料实现延性域磨削。

超高速磨削具有的特点为:

- 1) 磨粒相对工件的速度已经接近于应力波在材料中的传播速度量级,使材料变形区域明显变小,消耗的切削能量更集中于磨屑的形成,磨削力和比磨削能小,工件变形小。因此,磨削深度一定时,可以使用更高的磨削工艺参数,金属磨除率高。
- 2) 超高的磨削速度使单颗磨粒受力小,磨损少,砂轮寿命长。
- 3) 磨削表面粗糙度值会随砂轮速度的提高而降低,磨削热量也主要集中在磨屑中而飞散,工件表面温度低,受力和受热变质层薄,表面加工质量高。
- 4) 在超高速磨削条件下,变形区材料应变率高,相当于在高速绝热冲击条件下完成切削,使材料更易于磨除,并使难磨材料的磨削性能改善。可以对硬脆材料实现延性域磨削,同时也增加了韧性材料在弹性小变形阶段被去除的比率。

超高速磨削以极高的磨削效率、极大的砂轮磨削比和良好的加工表面完整性,与传统磨削方式形成了很大的差别。传统的磨削加工余量是很小的、低效率的,是一种精密加工方法,往往作为机械加工的最后一道工序,以最终保证零件所要求的尺寸和形状精度以及零件的表面完整性。该种磨削方法虽然在达到的加工精度和表面粗糙度方面具有无可比拟的优势,但其金属磨除率 Z_w (单位时间内磨除材料的体积, mm^3/s) 难以与其他切削抗衡。这是因为 Z_w 等于磨屑平均断面积、磨屑平均长度和单位时间内的作用磨粒数(磨屑数)三者的乘积。普通磨削的金属比磨除率不足 $10\text{mm}^3/(\text{mm} \cdot \text{s})$,与普通车削、铣削相去甚远。近年来,随着超高速磨削机理、金刚石砂轮和 CBN 砂轮、高速主轴系统、进给系统、磨削液、磨削自动化和智能化、磨削液注入系统和砂轮修整等相关新技术的应用,超高速磨削技术已成为集高新技术为一体的先进制造技术的重要组成部分。

高效磨削技术的应用已经向人们表明,磨削同样可以是一种高效的精密切削加工方法。根据美国《2000 年机械加工技术趋势》(机械加工技术协会的会员刊物)的分析,磨削加工位居最受欢迎的机械加工方式的第三位。在某些工序中,以磨代车、以磨代铣已经得到成功应用,在美国的一些汽车制造厂,磨床的数量占有所有切削机床总量的 28% 以上。美国先进制造科技协会主席 Stuart Salmon 博士认为,磨削加工在很多领域内,不论从技术上或经济上,都可与切削加工相匹敌,在有些领域甚至是唯一的加工方法。

1.5 超高速磨削的方法与类别

超高速磨削加工方法主要包括超高速精密磨削、高效深磨、快速点磨削与随动磨削等(表 1-1)。

表 1-1 几种磨削方法比较

工 艺 参 数	磨 削 方 式				
	普通磨削	超高速精密磨削	高效深磨	缓进给磨削	快速点磨削
磨削深度/mm	小	小	大	大	较大
	0.001 ~ 0.05	0.003 ~ 0.05	0.1 ~ 30	0.1 ~ 30	0.1 ~ 20
工件速度/(m/min)	高	高	高	低	高
	1 ~ 30	1.0 ~ 10	0.5 ~ 10	0.05 ~ 0.5	
砂轮线速度/(m/s)	低	高	高	低	高
	20 ~ 60	100 ~ 200	150 ~ 200	20 ~ 60	120 ~ 250
金属比磨除率 /[mm ³ /(mm·s)]	低	中	高	中	高
	0.1 ~ 10	< 60	50 ~ 2000	2 ~ 20	50 ~ 1500
磨削液	水基磨削液	水基磨削液	油基磨削液	水基磨削液	油基磨削液

1.5.1 超高速精密磨削

超高速精密磨削是使用砂轮线速度为 150 ~ 200m/s 的 CBN 砂轮,配以高性能计算机数控(CNC)系统和高精度微进给机构,并通过精密修整微细磨料磨具,采用亚微米级磨削深度和洁净加工环境获得高效率与亚微米级以下的尺寸精度的加工方法。超高速精密磨削既能保证高的加工精度,又可获得高的加工效率。

1.5.2 高效深切磨削

高效深切磨削即高效深磨(High Efficiency Deep Grinding, HEDG)技术是近几年发展起来的一种集砂轮高速度(100 ~ 250m/s)、高进给速度(0.5 ~ 10m/min)和大磨削深度(0.1 ~ 30mm)为一体的高效率磨削技术。高效深磨概念是由德国 Bremen 大学 Werner 教授于 1980 年创立的,目前欧洲企业在高效深磨技术应用方面居领先地位。高效深磨可直观地看成是缓进给磨削和超高速磨削的结合,与普通磨削不同的是高效深磨可以通过一个磨削行程,完成过去由车、铣、磨等多个工序组成的粗精加工过程,获得远高于普通磨削加工的金属磨除率(磨除率比普通磨削高 100 ~ 1000 倍),表面质量也可达到普通磨削水平。由于它使用比缓进给磨削快得多的进给速度,生产率大幅度提高。后来又进一步在 CBN 砂轮基础上开发出 200 ~ 300m/s 的超高速深磨磨床。采用陶瓷结合剂砂轮以 120m/s 的速度磨削,比磨除率可达 500 ~ 1000mm³/(mm·s),比车削和铣削高 5 倍以上。英国用盘形 CBN 砂轮对低合金钢 51CrV4 进行了 146m/s 的高效深磨试验研究,金属比磨除率超过 400mm³/(mm·s)。德国

Guehring Automation 公司的 FD613 超高速平面磨床, 以 150m/s 及 CBN 砂轮磨削宽 $1 \sim 10\text{mm}$ 、深 30mm 的转子槽时工作台进给速度达 3000mm/min , 在 125m/s 沟槽磨床上, 磨削深 20mm 的钻头沟槽可一次完成, 金属比磨除率达 $500400\text{mm}^3/(\text{mm} \cdot \text{s})$ 。高效成形磨削作为高效深磨的一种也得到广泛应用, 并可借助 CNC 系统和 CBN 成形砂轮完成更复杂型面的加工, 表面质量可与普通磨削媲美。此项技术已成功地用于丝杠、螺杆、齿轮、转子槽、工具沟槽等的以磨代铣加工。

1.5.3 快速点磨削

快速点磨削(Quick point Grinding)是由德国 Junker 公司于 1994 年开发的新型超高速磨削技术。它集成了超高速磨削、CBN 超硬磨料及 CNC 柔性加工三大先进技术, 具有优良的加工性能, 是超高速磨削技术在高效率、高柔性和大批量生产高质量稳定性方面的又一新发展, 是利用钎焊 CBN 薄砂轮(宽度仅有几毫米)和超高砂轮线速度($120 \sim 180\text{m/s}$, 高的可达 $200 \sim 250\text{m/s}$)来实现的。加工时使砂轮轴线与工件轴线在水平方向上形成一定倾斜角, 以使砂轮与工件之间的接触理论上变成点接触。使用薄砂轮与工件形成小面积点接触, 综合利用连续轨迹数控技术, 以超高速磨削, 可以合并车、磨工序, 这样可大大减小磨削接触区面积。而极高的磨削速度既可使磨屑变薄、磨粒负荷减轻, 又可使热来不及传入工件和砂轮而被磨屑带走, 从而提高工件加工精度和表面质量。

快速点磨削工艺的工作原理: 在磨削工件外圆时, 砂轮与工件是以点接触进行磨削。砂轮对工件的磨削加工类似于一个微小的刀尖对工件的车削加工, 磨削力和磨削热都非常小, 并且砂轮总是保持同进给状态。砂轮的进给和磨削速度在磨削轴颈时可通过编制程序使其保持不变。而传统的磨削方法, 砂轮与工件是线接触磨削, 砂轮与工件的接触时间长, 磨削力和磨削热都非常大, 并且不能做到砂轮的进给和磨削速度在磨削轴颈时保持不变。

我国一汽-大众汽车有限公司应用该技术磨削发动机凸轮轴, 砂轮转速为 4300r/min , 砂轮修整一次可磨削 3000 件。

1) 数控控制砂轮在垂直方向偏角为 $\pm 0.5^\circ$, 水平方向在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 范围内变化, 以减小磨削接触面积和砂轮干涉。砂轮动平衡可在机自动完成, 径向圆跳动精度在 0.002mm 内。

2) 采用厚度为 $4 \sim 6\text{mm}$ 的薄砂轮, “三点定位安装系统”快速安装, 重复定位精度高, 并可解决离心力造成的胀孔问题。

3) 工件也作高速相对旋转, 砂轮和工件速度叠加后可达 $200 \sim 250\text{m/s}$ 。

4) 在磨削外圆时由砂轮侧边完成材料去除, 周边仅起光磨作用。砂轮圆周磨损极慢, 使用寿命长(最长可达 1 年), 磨削比可达 $16000 \sim 60000$, 这时砂轮每次修整可加工 200000 个零件, 生产率比普通磨削提高 6 倍。

5) 装有两坐标数控金刚石滚轮修整器, 在砂轮宽度方向磨损达 10% 以上时自动精确修整, 避免过早修整以控制成本。

6) 磨削接触面积小, 磨削力低, 磨削热少; 同时, 砂轮薄, 冷却效果好。因此, 磨削温度大为降低, 甚至可以实现“冷态”加工, 提高了加工精度和表面质量。

7) 由于磨削力极小, 靠顶尖摩擦力即能方便地夹紧工件, 被称为“顶尖磨削”。

8) 采用 CNC 一次安装后可完成外圆、锥面、曲面、台肩等所有外形加工, 并可使车、磨工序合并; 进一步提高效率。用快速点磨削方法磨削主轴, 一次装夹可完成 4 个部位的磨

削, 与传统工艺相比, 磨床台数由 11 台降低为 7 台, 投资降低了 20%, 运行成本降低了 77%。

1.5.4 重负荷荒磨

重负荷荒磨是以较大的法向修磨压力快速切除加工余量为目的的磨削方法, 适用于钢坯的修磨和铸锻件的清理以及钢板的粗磨等, 磨除金属量一般占钢坯质量的 3%~7%, 一般不需要修整砂轮, 磨削速度通常在 60~120m/s, 法向磨削力一般在 2.5~15kN, 金属磨除率达 1000kg/h, 磨削功率一般为 100~150kW, 个别达到 300kW。该技术近年发展较快, 砂轮线速度已普遍达到 80m/s, 有的高达 120m/s; 磨削法向力可达 10000~12000N; 金属磨除率可达 500~600kg/h, 最高可达 1000kg/h。重负荷荒磨机床已基本实现自动化, 法向压力可随进给速度的变化而自动调整并能保持砂轮转速恒定, 大大提高了荒磨生产率。东北大学从 20 世纪 70 年代开始进行高速重负荷钢坯荒磨实验研究, 建立了完整的高速重负荷荒磨理论体系, 近年还研制开发了用于钢坯自动修磨的并联机器人, 最大修磨压力达 2520~5000N, 最大金属磨除率达 1780g/min。重负荷荒磨的技术特点包括:

- 1) 磨削压力、砂轮速度和金属磨除率高, 磨削功率大, 要求机床具有足够的刚度和强度。
- 2) 使用高强度、高硬度和粗粒度的重负荷荒磨砂轮。一般均采用树脂结合剂和棕刚玉、微晶刚玉、烧结刚玉等高韧性磨料, 超硬级硬度, 且砂轮不需要修整。
- 3) 采用干式磨削方式。

1.5.5 随动磨削

随动磨削又叫切点跟踪磨削, 也有人称这种磨削加工方法为曲轴的连续轨迹数控磨削 (Continuous path controlled grinding of crankshafts)。

切点跟踪磨削是随磨削技术和数控技术 (特别是伺服驱动和控制技术) 的发展而出现的一种新型的工序集中式磨削加工方法, 其工作原理是通过控制工件的旋转运动 (C 轴) 和砂轮的横向进给运动 (X 轴), 使砂轮外圆与工件被加工表面轮廓始终相切, 并使磨削厚度相同, 从而实现偏心圆和非圆表面的加工。切点跟踪磨削主要用于曲轴零件和凸轮轴零件的加工。

对于曲轴类零件的磨削加工, 切点跟踪磨削提出以曲轴的主轴颈定位, 以主轴颈中心连线为回转中心, 一次装夹依次磨出主轴颈和连杆颈。其中主轴颈的磨削方式与现有的主轴颈磨床上磨削主轴颈的方式相同; 而磨削连杆颈的实现方式为: 通过采用 CNC 技术, 根据建立的连杆颈磨削运动的数学模型, 控制砂轮的横向进给 (X 轴) 和工件的旋转运动 (C 轴) 联动插补, 以保证连杆颈的磨削精度和表面质量。在整个曲轴的磨削过程中, 数控插补所控制的轴 (X 轴和 C 轴) 的运动轨迹是连续的。

1.6 超高速磨削的技术内涵

1.6.1 降低磨削力, 提高磨削效率

由于超高速磨削时磨屑厚度变薄, 在磨削效率不变的条件下, 法向磨削力会随磨削速度

v_s 的增高而显著减少(v_s 为 200m/s 时的法向磨削力仅为 80m/s 时的 46%), 从而使工艺系统的变形减少, 加之超高速磨削的激振频率远高于工艺系统的固有频率, 不会引起共振。其共同结果是促使磨削精度提高。

由于 v_s 增大、 $h_{\max}$ 减小, 使切向磨削力和法向磨削力都下降, 使磨床-砂轮-工件这一工艺系统受力变形小, 零件加工精度提高。这一点对磨削细长轴等刚性较差的零件尤为有利。在实际生产中, 如保持相同的磨削质量, 则可以提高工件进给速度, 即提高磨除率, 磨削速度越高, 单位时间内参与切削的磨粒数越多, 磨除的磨屑增多, 且工件进给速度应与砂轮线速度的 1.13 次方成比例, 故超高速磨削会使磨削效率大幅提高。由此可见, 超高速磨削可以大幅度提高生产率, 减少设备使用台数。

超高速磨削时磨削速度 $v_s > 150\text{m/s}$, 由于单位时间内作用的磨粒数增加, 使金属比磨除率成倍增加, 最高可达 $2000\text{mm}^3/(\text{mm} \cdot \text{s})$, 比普通磨削可提高几倍至几十倍。试验表明: 采用 CBN 砂轮进行超高速磨削, 砂轮线速度由 80m/s 提高至 300m/s 时, 金属比磨除率由 $50\text{mm}^3/(\text{mm} \cdot \text{s})$ 提高至 $1000\text{mm}^3/(\text{mm} \cdot \text{s})$ 。采用 200m/s 超高速磨削, 在磨削力不变的情况下, 金属比磨除率比采用 80m/s 磨削时提高 150%; 采用 340m/s 超高速磨削, 金属比磨除率比采用 180m/s 磨削时提高 200%。如采用电镀 CBN 砂轮以 123m/s 的高速磨削割草机曲轴, 原来需要 6 个车削和 3 个磨削工序, 现在只需要 3 个磨削工序, 生产时间减少 65%, 每小时可以加工 180 个工件。以 125m/s 的速度应用普通砂轮高效磨削淬硬低碳钢 42CrMo4, 比磨除率达 $167\text{mm}^3/(\text{mm} \cdot \text{s})$, 比缓进给磨削大 11 倍。因而, 提高磨削速度可使磨削效率显著提高。

1.6.2 砂轮磨损小, 提高砂轮使用寿命

提高砂轮线速度后, 单位时间内磨削区内的磨粒数增加, 在进给量保持不变的情况下, 单颗磨粒的切削厚度变薄, 砂轮-工件系统受力变形减小, 磨削力的降低使工件加工精度得以提高, 尤其是对刚性较差的细长类工件来说, 这一点尤为有利。砂轮线速度对磨削力和表面粗糙度的影响如图 1-3 所示。

由于磨粒上承受的磨削力减小, 可减少砂轮磨损、大幅度延长砂轮寿命, 有助于实现磨削加工自动化。在 Z'_w 相同的条件下, v_s 由 80m/s 提高到 200m/s 时, 砂轮寿命可提高 6 ~ 8.5 倍, 在 Z'_w 提高一倍的情况下, 砂轮寿命仍可提高一倍。

与此相应, 超高速磨削时单个磨粒上所承受的磨削力大为减小, 从而降低了砂轮的磨损。许多试验表明, 当磨削力不变时, 砂轮线速度 v_s 从 80m/s 提高至 200m/s, 磨削效率提高 2.5 倍, CBN 砂轮的寿命也延长了 1 倍。

1.6.3 改善表面完整性

虽然超高速磨削时采用大磨削用量, 但由于传入工件的磨削热比例远低于普通磨削, 因而可以不发生磨削表面热损伤, 并减小工件表面的残余应力, 有利于获得良好的表面物理性能和力学性能, 如图 1-3 所示。

在使用大磨削用量和具有极高的金属磨除率下, 可以不发生磨削表面损伤。当 v_s 提高以后, 在保持相同磨削效率的情况下, 可以提高加工表面质量。由于磨削过程可以看做无数磨粒的断续切削的合成结果, 每一单颗磨粒对材料的切削过程极短, 当砂轮直径为 400mm、

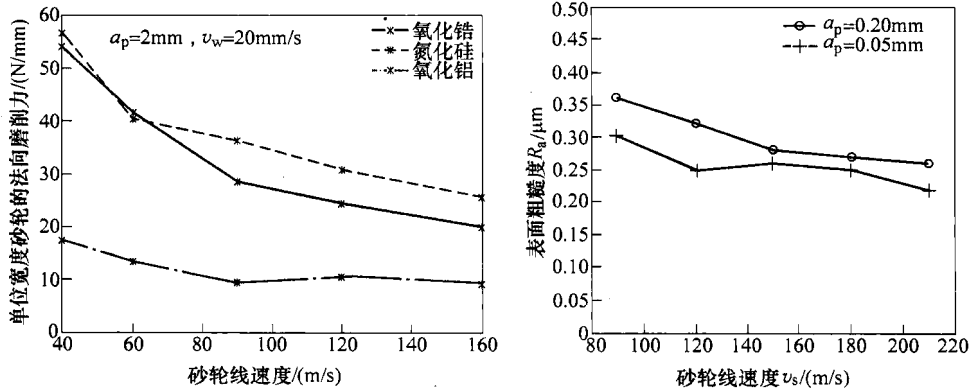


图 1-3 砂轮线速度的影响

磨削深度为 0.1mm 时, 采用 $v_s = 30\text{m/s}$ 的速度磨削, 磨屑形成时间仅 0.2ms。而当 v_s 提高到 150m/s 时, 这一时间仅为 0.04ms, 在极短的时间内完成的磨屑的高应变率(可近似认为接近于磨削速度)形成过程中, 工件表面的塑性变形层变浅, 磨削的沟痕两侧因塑性流动而形成的隆起高度变小, 磨粒对工件的耕犁作用时间变短, 程度缓和, 磨削表面粗糙度可以下降。有试验证明, 当其他条件相同时 ($v_s = 33\text{m/s}, 100\text{m/s}, 200\text{m/s}$ 情况下), R_a 分别为 $2.0\mu\text{m}$ 、 $1.4\mu\text{m}$ 、 $1.1\mu\text{m}$ 。在对 45 钢进行磨削工艺试验时, 也得出相似的结论: 采用 CBN 砂轮 80 号粒度、 $a_p = 0.2\text{mm}$ 、 $v_w = 2000\text{mm/min}$, 当 v_s 由 90m/s 提高至 210m/s 时, R_a 由 $0.37\mu\text{m}$ 下降到 $0.26\mu\text{m}$ 。

1.6.4 降低磨削温度

超高速磨削过程中, 磨屑较高的应变率使工件表层硬化现象和残余应力倾向减小, 磨粒在磨削区移动速度成倍提高, 工件进给速度也相应加快。由于应变率响应的温度滞后现象, 很大一部分热量还没有来得及传入工件内部就被砂轮、磨削液、空气流带走。因此, 磨削温度有所降低, 能越过容易发生热损伤的区域, 极大地扩展了磨削工艺的应用范围, 也有利于提高磨削加工精度。如图 1-4 所示, 图中试验条件是工件进给速度为 4m/min , 磨削深度为 0.03mm。可见磨削温度在磨削速度大于 210m/s 后会下降。磨削速度在 360m/s 以下的试验表明, 在一个较窄的速度范围(180 ~ 200m/s)内, 磨粒与工件的摩擦状态由固态向液态急剧变化, 并伴随着磨削力的下降。

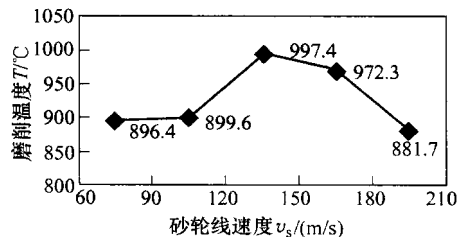


图 1-4 砂轮线速度对磨削温度的影响

1.6.5 提高加工精度

由于磨屑厚度变薄, 在磨削效率不变时, 法向磨削力随磨削速度的增大而大幅度减小, 从而减小磨削过程中的变形, 提高工件的加工精度。此外, 超高速磨削时机床主轴高速运转, 激振频率远离“机床—工件—磨具”工艺系统的固有频率, 从而减小系统的振动, 既有利于提