

磨削基础

郑善良编著

MO XIAO JI CHU MO XIAO JI CHU

上海科学技术出版社

磨 削 基 础

郑善良 编著

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书根据国内外磨削研究成果,从切削理论和摩擦学等方面,来研究磨削过程的各种物理现象,讨论磨削方面的有关问题。全书有八章:绪论、砂轮、切屑形成机理、磨削力、磨削热、砂轮修整及其对磨削性能的影响、磨削液、砂轮磨损。书末还有附录。

本书可供从事机械科研、教学和生产的有关人员使用,也可供高、中等学校机械专业的学生参考。

磨 削 基 础

郑 善 良 编 著

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

发行所:上海发行所发行

江苏溧水印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 9 字数 204,000

1988年2月第1版 1988年2月第1次印刷

印数: 1—3,200

ISBN 7-5323-0550-3/TG·25

统一书号: 151.19·7553 定价: 2.20 元

本书所用主要符号

A	[mm ²]	面积
A_D	[mm ²]	修整金刚石磨损面积
A_g	[mm ²]	磨粒磨损面积
a	[μ m]	磨削深度
a_a	[μ m]	修整切入深度
a'	[μ m]	切残量
b	[mm]	磨削宽度
b_c	[mm]	接触宽度
b_s	[mm]	砂轮宽度
b_m	[μ m]	未变形切屑的平均宽度
C	[(N·s)/m]	阻尼系数
c		单位砂轮表面积的有效磨粒数
d_g	[mm]	砂轮当量直径
d_g	[mm]	磨粒的平均直径
d_r	[mm]	滚轮修整器的直径
d_s	[mm]	砂轮直径
d_w	[mm]	工件直径
E	[N/mm ²]	弹性模量
F	[N]	磨削力
F_a	[N]	轴向磨削力
F_n	[N]	法向磨削力
F'_n	[N/mm]	单位宽度法向磨削力
F_t	[N]	切向磨削力
F'_t	[N/mm]	单位宽度切向磨削力
f	[Hz]	频率
G		磨削比
h	[μ m]	未变形切屑厚度
h_m	[μ m]	未变形切屑的平均厚度
h_{max}	[μ m]	未变形切屑的最大厚度
h_{eg}	[μ m]	当量切屑厚度
ϕ_g	[°]	磨粒的名义切入角
ϕ_{is}	[°]	磨粒的实际切入角
ϕ_d		修整行程数

K	[N/mm]	工艺系统刚度
\bar{K}	[cm ² /s]	热扩散率
k	[J/(cm·s·°C)]	热导率(导热系数)
k_c	[N/mm]	接触刚度
k_g	[N/mm]	磨削刚度
L_d	[mm]	磨粒间的动态距离
L_s	[mm]	磨粒间的静态距离
l_o	[mm]	砂轮与工件间的几何接触长度
l_m	[mm]	未变形切屑的平均长度
m	[kg]	质量
n_d	[r/min]	滚轮修整器转速
n_s	[r/min]	砂轮转速
n_w	[r/min]	工件转速
P	[kW]	功率
Q_s	[J/(cm ² ·s)]	热流密度
q		砂轮与工件的速比
R_d	[μm]	中心线平均高度粗糙度
R_{max}	[μm]	波峰谷间最大高度粗糙度
R_{rms}	[μm]	均方根粗糙度
r_s	[mm]	砂轮半径
r_w	[mm]	工件半径
\dot{r}_s	[mm/s]	砂轮半径变化速度
\dot{r}_w	[mm]	工件半径变化速度
S	[mm/r]	工件每转(纵向)进给量
S_d	[mm/r]	修整进给量
S_f	[mm/r]	工件每转切入进给量
T	[s]	周期
t	[s]	时间
u	[J]	热能
V_s	[mm ³]	砂轮磨损体积
V_w	[mm ³]	金属磨除体积
V'_w	[mm ³ /mm]	单位宽度的金属磨除量
v_f	[mm/min]	切入进给率
v_r	[m/min]	修整滚轮的圆周速度
v_s	[m/s]	砂轮圆周速度
v_w	[m/min]	工件圆周速度
w	[μm]	磨粒磨损宽度
Z'	[mm ³ /s]	金属磨除率
Z'_s	[mm ³ /(s·mm)]	单位磨削宽度的砂轮磨损率

Z'_w	$[\text{mm}^3/(\text{s}\cdot\text{mm})]$	单位磨削宽度的金属磨除率
A, A_w	$[\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{s})]$	金属磨除参数
ε		应变
ζ		阻尼率
θ	$[\text{°C}]$	温度
μ		摩擦系数
ν		泊桑比
σ	$[\text{N}/\text{mm}^2]$	应力
φ	$[\text{°}]$	剪切角
ω	$[\text{rad}/\text{s}]$	角速度

目 录

本书所用主要符号

第一章 绪论	1
1.1 磨料加工概况	1
1.2 磨削的各种型式及其分类	2
1.3 磨削研究所涉及的一些基本问题	4
第二章 砂轮	5
2.1 砂轮的特征	5
2.2 磨料	5
2.2.1 磨料的种类和基本要求	5
2.2.2 氧化物系磨料	7
2.2.3 碳化物系磨料	8
2.2.4 混合磨料	9
2.2.5 超硬磨料	9
2.3 磨粒的尺寸和形状	10
2.3.1 磨粒的尺寸	10
2.3.2 磨粒的几何形状	11
2.4 砂轮的硬度和组织	11
2.4.1 砂轮的硬度	11
2.4.2 砂轮的組織	13
2.5 结合剂	13
2.6 砂轮的充填料	13
2.7 砂轮的强度	14
2.8 砂轮的弹性	15
第三章 切屑形成机理	17
3.1 切屑形成的有关因素	17
3.2 切削与磨削在切屑形成上的差别	17
3.3 单粒磨削的切屑形成	19
3.3.1 单粒磨削的研究概况	19
3.3.2 磨粒在砂轮上的安装弹性	20
3.3.3 前角对切屑形成的影响	20
3.3.4 一种单粒磨削的模式	22
3.3.5 单粒磨削试验	23
3.3.6 磨削表面的形成	25
3.3.7 工件材料的性能对切屑形成的影响	27
3.4 磨削中与切屑形成有关的参数	28

3.4.1	概况	28
3.4.2	砂轮的当量直径 d_e	28
3.4.3	砂轮与工件的几何接触长度 l_c	29
3.4.4	切屑厚度 h_{max} 、 h_m 和 h_{eq}	29
3.5	砂轮表面形貌图及一些动态的切削参数	32
3.5.1	概述	32
3.5.2	砂轮局部地区的磨粒分布及其对切屑形成的影响	33
3.5.3	砂轮表面形貌图的测定	34
3.5.4	评定砂轮形貌图的一些参数	35
3.5.5	动态切削刃数和静态切削刃数	35
3.5.6	砂轮形貌图对切屑形成的关系	36
第四章	磨削力	38
4.1	概述	38
4.2	有关磨削力的一些基本情况	38
4.2.1	磨削力的组成	38
4.2.2	磨削条件和砂轮修整对磨削力的影响	40
4.2.3	磨削循环中磨削力的变化	40
4.3	磨削力方程	40
4.3.1	磨削力方程举例	40
4.3.2	磨削力方程的切削部分和摩擦部分	41
4.3.3	磨削力方程的实际应用	42
4.4	磨削力与一些基本磨削参数的关系	43
4.4.1	磨削过程概况	43
4.4.2	磨削力与金属去除率的关系	44
4.4.3	磨削力与砂轮磨损率的关系	45
4.4.4	磨削力与表面粗糙度的关系	46
4.5	磨削循环	46
4.5.1	磨削循环的几个阶段	46
4.5.2	过渡磨削阶段的规律	47
4.5.3	无火花磨削阶段的规律	48
4.5.4	磨削循环的实例	50
4.6	磨削过程中工件原始误差的修正过程	52
4.7	凸轮磨削时磨削力波动对形状误差的影响	53
第五章	磨削热	56
5.1	磨削热及其涉及的问题	56
5.2	磨削消耗的能量及其分布	56
5.2.1	磨削消耗的能量	56
5.2.2	磨削能量的分布	57
5.3	磨削区温度分布的理论分析	58
5.3.1	磨削区的热模型	58
5.3.2	带状运动热源引起的温度分布情况	59
5.3.3	实验验证	60

5.3.4	降低磨削区温度的措施	61
5.3.5	根据磨削区的温度分析对润滑冷却提出的几点意见	62
5.4	几种特殊磨削型式的热现象	62
5.4.1	刃尖形工件的磨削	62
5.4.2	切割磨削	63
5.4.3	缓进给强力磨削	64
5.4.4	间断磨削	65
5.5	磨削热的影响层	67
5.5.1	热影响层的几种类型及其与磨削温度的关系	67
5.5.2	表面烧伤的表现形式	67
5.5.3	表面烧伤的控制	69
5.6	磨削表面的残余应力	71
5.6.1	表面残余应力的形成机理	71
5.6.2	表面残余应力的分布形态	73
5.6.3	影响表面残余应力的诸因素	74
5.7	磨削热对工件精度的影响	76
5.7.1	工件平均温度对加工精度的影响	76
5.7.2	磨削区温度分布所引起的局部热变形	77
5.7.3	温度分布不均匀引起的形状误差	78
第六章	砂轮修整及其对磨削性能的影响	81
6.1	修整对砂轮形貌的影响	81
6.2	车削法修整	82
6.2.1	金刚石笔的安装	82
6.2.2	修整条件的选择	82
6.2.3	车削法修整后砂轮表面的宏观形貌及其磨削表面的特征	84
6.2.4	金刚石片状修整器	85
6.3	滚压法修整	85
6.4	用金刚石滚轮修整	86
6.4.1	基本参数	87
6.4.2	修整力和比能	87
6.4.3	砂轮表面粗糙度和磨削表面质量	88
6.5	耐用度和生产率	89
第七章	磨削液	93
7.1	磨削液的基本要求	93
7.2	磨削液的基本类型和性能	94
7.2.1	非水溶性磨削液	94
7.2.2	乳化型水溶性磨削液	95
7.2.3	透明水溶性磨削液	95
7.3	固态磨削剂	97
7.4	砂轮表面的气流屏障	97
7.4.1	砂轮表面气流的分布情况	98
7.4.2	砂轮的组织和表面形貌对气流的影响	98

7.4.3	砂轮速度对气流的影响	99
7.4.4	砂轮罩壳的影响	100
7.5	输液临界速度的确定	100
7.6	磨削液的供给方法	101
7.7	砂轮表面的高压冲洗	103
7.7.1	砂轮的堵塞	103
7.7.2	高压冲洗的效果	103
7.7.3	一些高压冲洗方案	103
7.8	磨削液的净化	104
第八章 砂轮磨损		106
8.1	砂轮磨损概述	106
8.2	磨削区的物理化学现象	106
8.2.1	磨削区的物理状态	106
8.2.2	磨削区的化学反应	107
8.3	砂轮磨损的几种形态	109
8.3.1	磨粒的磨耗、破碎和脱落	109
8.3.2	砂轮的轮廓磨损	109
8.4	磨粒的磨耗磨损	110
8.4.1	氧化磨损	110
8.4.2	磨料磨损	111
8.4.3	磨粒与工件的相互作用和扩散磨损	113
8.4.4	塑性磨损	114
8.5	磨粒的破碎	115
8.5.1	磨粒在热和力的交变载荷下的疲劳磨损	115
8.5.2	磨粒的易碎性	116
8.5.3	磨粒的破碎	117
8.6	砂轮硬度对磨损形态的影响	117
8.7	工件材料在磨粒上的粘着现象	119
8.7.1	粘着现象的概述	119
8.7.2	离子尺寸和电荷匹配的影响	120
8.7.3	晶体结构和点阵参数的影响	120
8.7.4	氧的亲合力和形成金属氧化物的自由能的影响	122
8.7.5	金属氧化物和刚玉的热膨胀系数	123
8.7.6	金属氧化物在刚玉中的固体溶解度	123
8.8	砂轮堵塞	123
8.8.1	砂轮堵塞的形态及其起因	123
8.8.2	影响堵塞的因素	124
8.8.3	堵塞对磨削效果的影响	124
8.9	砂轮的轮廓磨损	124
8.9.1	径向磨损和边角磨损	124
8.9.2	外圆纵磨的砂轮轮廓磨损	125

8.10 砂轮的适应性问题	126
8.10.1 磨料的适应性.....	126
8.10.2 砂轮性能对磨削条件的适应性.....	127
附录1 国内外磨料和砂轮对照表	130
附录2 本书引用的工件材料成分	131

第一章 绪 论

1.1 磨料加工概况

磨料加工是人类最早使用的生产手段之一。远在石器时代,人类已开始使用砂石研磨各种贝壳、石头和兽骨来制造生活和狩猎工具。随着青铜器的出现,磨料加工的技术进一步发展,成为兵器制造中一种很重要的工艺手段。我国汉代的铜镜,研磨技术已达到相当高的水平,能够正确反映人像,可见平面度和表面粗糙度均已接近镜面的要求。铁器出现以后,磨料加工得到更广泛的应用,成为一种很普遍的工艺。

磨削技术起源于18世纪中期,那时出现了第一台外圆磨床,稍后又出现了平面磨床。所用的砂轮均用石英石和石榴石等天然石料敲凿而成。其后出现了用天然磨料和粘土烧结的砂轮。1901年以后,陆续发明了人工熔炼的碳化硅和氧化铝(刚玉)磨料,它们有良好的磨削性能和经济效果,至今仍在普遍应用。

四十年代末期,解决了人造金刚石的工业生产技术。1957年制成了立方晶体的氮化硼。这些超硬磨料的出现,使磨削工艺进一步扩大了它的应用范围。

以前,我国的磨料工业非常薄弱,没有现代化的磨料、磨具制造业。建国以后,随着经济建设的发展,成立了专业研究所,建立了一批现代化的砂轮厂和磨床制造厂,为磨料加工的普遍应用提供了物质条件。1955年以前,试制并生产了黑、绿色碳化硅、和棕、白刚玉。其后又陆续发展了各种磨料和磨具的新品种,包括人造金刚石和立方氮化硼的工业生产。目前,磨料、磨具已能满足生产的需要,基本上赶上了国际水平。此外,还根据我国资源的特点,发展了多种性能优良的稀土碳化硅和稀土刚玉。

根据工艺目的和要求不同,磨料加工已发展为多种型式,可以分为固定磨粒加工和自由磨粒加工两大类,如图1.1所示(图中的冲击磨削即超声波磨粒加工)。各种加工形式的用途、工作原理和运动情况有相当大的差别,但是都存在摩擦、微切削和表面化学反应等现象,只是形式和程度不同。

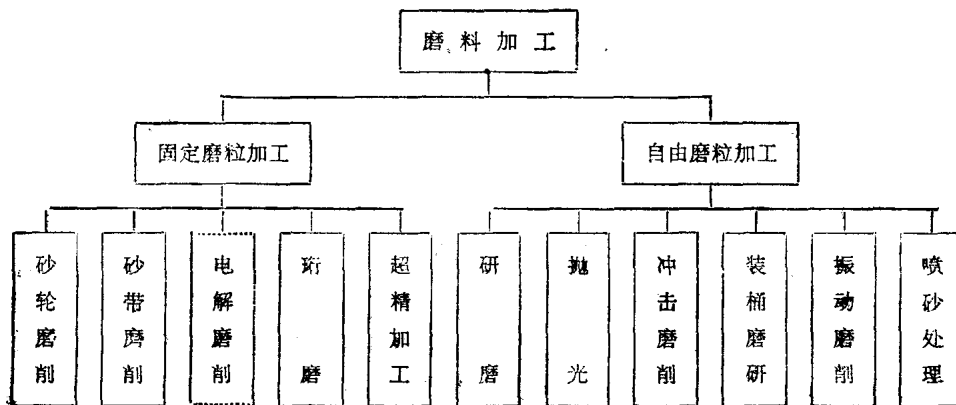


图 1.1 磨料加工的各种类型

砂轮磨削是应用最广泛的一种高生产率的加工方法,往往作为工件的最终加工;它与砂带磨削有很多共同之处,其区别主要在于工具的形态不同。

近年来,磨削方法向高速、高效方向发展。对于磨削精度和表面质量的要求越来越高。磨削过程自动化的进展又提出了种种新问题。这些都促使磨削研究进一步深入。随着毛坯工艺的改进,加工余量减少,磨削在切削加工领域中的地位就变得越来越重要了。

1.2 磨削的各种型式及其分类

磨削是磨料加工中最普遍的一种加工形式,它有两项基本目的:(1)把毛坯加工成具有一定的尺寸和形状精度以及表面物理性能的零件;(2)以尽可能低的费用切除材料。在钢铁工业中,它广泛地用于钢锭荒磨去皮和钢料切割。在机械制造中,它大量用于零件的半精和精加工,它也是淬硬钢和各种高硬度、高强度合金的最有效的加工手段。用它来加工陶瓷和光学玻璃等非金属材料,则是其他加工方法所难以代替的。

近年来,砂带磨削逐步推广,随着砂带耐用度的提高和静电植砂技术的发展,在某些方面有代替砂轮磨削的趋势。砂带磨削还可以广泛地应用于木材加工和皮革工业。

磨削加工的尺寸精度可达微米级,其形状精度(例如圆度)可达亚微米级。一般磨削表面的粗糙度为 $R_z 0.8 \sim 6.3 \mu\text{m}$,采取适当措施后,还可以进一步改善,甚至磨出镜面。

砂轮是所有切削刀具中唯一具有自锐能力的刀具。以切除余量为主的各种磨削,在砂轮的整个使用周期中,往往不需要进行修整,而靠其本身的自锐作用来保持切削能力。一般磨削中,砂轮都有一定程度的自锐作用,只是在砂轮表面地形或轮廓超出某一指标时才需修整。砂轮可以临床进行修整,修整量往往可由磨床上的相应机构作自动补偿。这样可以大量节省一般切削加工中装刀、对刀和刃磨所消费的时间和费用。

长期以来,按照不同的加工要求,发展出品种繁多的磨床,几乎所有各种切削加工形式,均有相应的磨削方法。此外,尚有磨削所特有的一些方法,例如:无心磨削和双端面磨削等以工件的加工表面本身定位的高效率方法。宽砂轮磨削、高速磨削和强力磨削的发展,使磨削效率进一步提高。随着精密毛坯工艺的出现,在某些特定的条件下,已经能够直接从毛坯磨制零件。

磨床和磨削方法可以按照加工对象来分类,例如:外圆、内圆、平面、齿轮、螺纹、导轨、凸轮、曲轴等。也可以按其运动方式来区分,例如:一般外圆磨削与无心磨削;卧轴平磨、立轴平磨和双端面磨削等。

本书不准备对于磨削中的特殊性问题详细讨论,而拟对各类磨削所普遍存在的问题进行探讨。

磨削的类型虽然很多,但是从磨削区的基本情况来看,大致可分为两类。

(1) 控制切入压力的磨削(恒压力磨削)

通过磨头重量、杠杆、人力、液压系统或电气系统来控制砂轮对工件的压力。砂轮架、砂轮切割机 and 钢锭荒磨去皮机等往往采用这种型式。通过砂轮与工件之间接触压力的控制来调节砂轮的自锐作用。五十年代初,发展了控制力的内圆磨削,其优点在于通过接触压力的控制,可以控制工艺系统的弹性变形,亦即控制这种变形对于磨削形状误差的影响。此外,还可以控制磨削区的能量输入,以防止工件表面的热损伤。然而,如果选用的压力太低,自

锐作用消失, 砂轮将因磨损而钝化, 使它与工件的实际接触面积增加, 其结果将使切入速度(亦即金属切除率)降低。对于特定的砂轮与工件的组合, 可以通过试验来确定最佳压力, 以保证加工质量和适度的自锐作用。现代机械工业中, 已有一定数量的控制力磨床。

(2) 控制切入进给速度的磨削(定进给磨削)

砂轮以选定的速率垂直于磨削表面作切入进给。现在工厂中使用的磨床, 大多数采用这种进给型式。为了提高磨削效率, 有些磨床配备有专门的控制系統, 能够在一次磨削循环中, 按照磨削各阶段的情况, 合理地改变切入进给率, 以提高生产率和改善磨削质量。

外圆和内圆磨削时, 在砂轮宽度大于或等于磨削宽度的情况下, 往往采用连续的径向切入进给, 称为切入磨削, 这是一种高效率的磨削方式。在砂轮宽度小于磨削宽度的情况下, 工件要作纵向进给, 每行程或双行程, 砂轮作一次径向切入进给, 称为纵向磨削。

平面磨削窄零件时(砂轮宽度大于或等于磨削宽度), 工件每作一次或往复一次纵向行程, 砂轮作一次切入进给。磨削宽度较大时, 除纵向行程外, 还要作横向进给, 在磨出整个表面后, 砂轮才再次作切入进给。

其他各类磨削也有类似的各种进给情况。在定进给的磨削过程中, 法向磨削力是一个

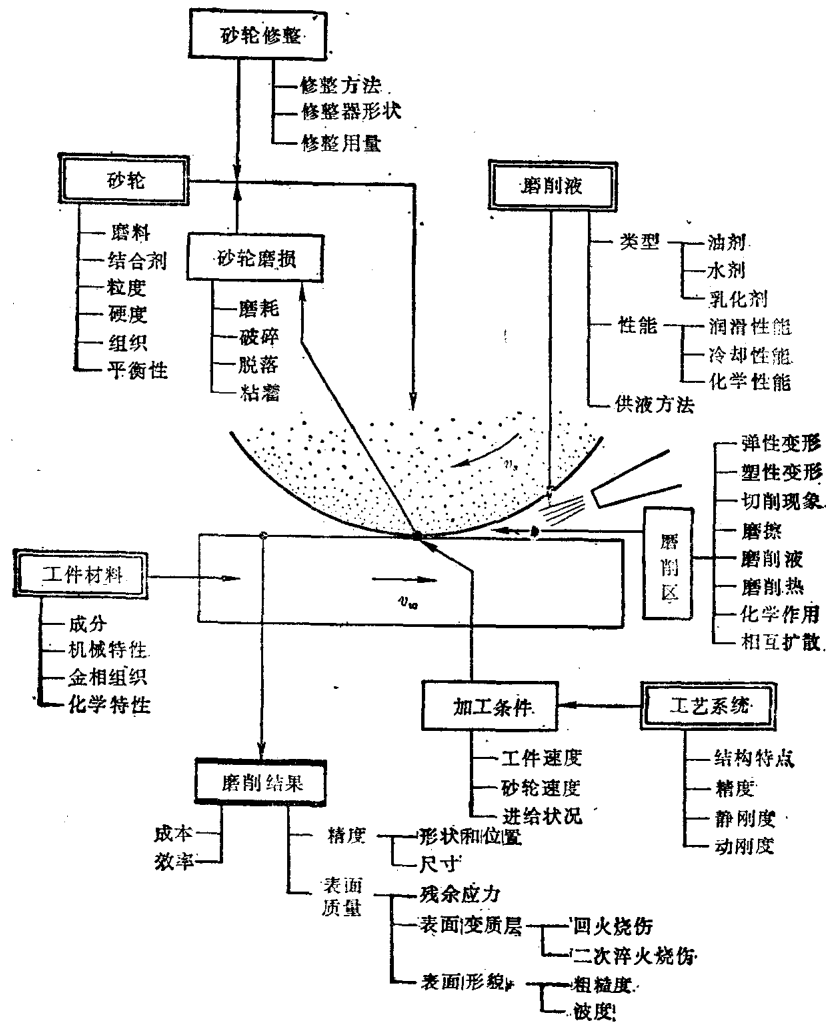


图 1.2 磨削有关的各因素

变量,随着砂轮钝化,此力增大,从而对磨削效果产生影响。为了简便起见,对于磨削的一些基本问题的研究,多数采取定进给切入磨削方式。

1.3 磨削研究所涉及的一些基本问题

磨削是一个复杂过程,兼有高速微切削和高速擦滑摩擦的特征。如果把磨削过程的输入条件加以细分,有三十多个可变因素,如图 1.2 所示。由此可见,磨削过程的研究,是一个跨多种学科的问题。

磨削过程包含各种物理现象,有大量随机因素。对于磨削的研究,大致有两种方式。一种是用数理统计和随机过程等数学方法。研究输入条件和输出(磨削结果)的关系,讨论某些输入参数的变化对输出影响的规律性,从中建立数学模型,供改进磨削效果和设计控制系统参考。另一种方式则从切削理论和摩擦学等方面,来研究磨削过程的各种物理现象,从而来讨论有关的一些基本问题。这种研究方式,往往会涉及多种基础学科。

本书的编写,基本上采取后一种方式,试图参考近年来国内外学者对于磨削研究的成果,根据自己的实践,对于图 1.2 中所涉及的各项因素作综合讨论,从中得出一些结论和看法,提供读者参考。由于磨削过程的多样性和复杂性,许多问题迄今尚未定论,有些问题还存在不同的看法。书中难免有错误之处,希望读者指正。

第二章 砂 轮

2.1 砂轮的特征

砂轮由一定比例的磨粒和结合剂制成,在烧结过程中形成气孔。砂轮中的磨粒、结合剂和气孔都是随机分布的,制造时应该力求均匀分布,使其性能均匀一致,这是砂轮很重要的指标。由于磨粒的随机分布,各磨粒的位置和方位并不一定处于磨削的最有利状态。砂带制造时,目前已应用静电植砂技术,使磨粒尖端向上,以获得较理想的切削刃。对于砂轮制造,尚缺乏使磨粒合理排列的方法,而依靠修整来形成切削刃。在磨削过程中,随着所选定的磨削条件不同,使砂轮的使用性能受到种种影响。此外还由于磨粒的磨损和粘着,使砂轮的磨削性能不断变化。因此,砂轮性能的特征可分别从它的固有特征和瞬时特征来讨论。

固有特征: 表明砂轮固定不变的因素,例如:磨粒材料、磨粒尺寸、砂轮硬度、结合剂和组织等。

瞬时特征: 表明砂轮工作面上切削刃的瞬时状态。例如:修整、磨损、粘着和堵塞等砂轮工作表面形貌图的变迁。

从试验研究和实际经验中可以看到,对于砂轮工作状况有较大影响的各种因素为:修整情况、磨削方式、磨削用量、机床刚度、砂轮磨损、工件材料和润滑冷却等。对于一个砂轮来看,这些因素不是常量。

决定砂轮磨削性能的不仅是它的固有特征,而且与瞬时特征有很大关系。对于砂轮的选择和使用,应该综合考虑这两项因素。

本章主要讨论砂轮固有特征的各项参数,将在以后有关章节讨论瞬时特征有关的问题。

国产砂轮的主要特征参数由 JB1181~1202-71 规定^[1],综合列于表 2.1。国外对于砂轮特征的规定方法,基本上与我国一致。然而,由于各制造厂对磨料的代号各异,各项指标也有差别,以及对砂轮或磨料作某种处理后派生出许多代号,对于磨削文献的阅读带来不少困难。为便于对本书所引资料的理解,在附录 1 摘要列出对照表以供参考。

由于砂轮的原材料、烧结温度及制造工艺略有差异,往往会对砂轮性能产生较大的影响,即使规格相同的砂轮,不同制造厂的产品在硬度上相差一级的情况是常见现象。因此,目前国际上共同合作的磨削研究,往往选定同一制造厂同样规格的产品,甚至要求同一批生产,以求性能一致,使试验的结果可以相互对照。在阅读文献资料时,应该充分注意砂轮性能的差异。

2.2 磨 料^{[1][3][12]}

2.2.1 磨料的种类和基本要求

磨料直接参与切削,是砂轮性能的最主要因素,它的基本要求为:

表 2.1 砂轮规格

刚玉	名称	棕刚玉	白刚玉	单晶刚玉	微晶刚玉	铬刚玉	铅刚玉	锃铍刚玉
	代号	GZ	GB	GD	GW	GG	GA	GP

碳化物	名称	黑色碳化硅	绿色碳化硅	立方碳化硅
	代号	TH	TL	TLD

超硬磨料	名称	人造金刚石	天然金刚石	立方氮化硼
	代号	JR	JT	JLD

粒 度 号	8*	10*	12*	14*	16*	20*	24*	30*	36*	46*	60*
	70*	80*	100*	120*	150*	180*	240*	280*	W40	W28	W14
	W10	W7	W5	W3.5	W2.5	W1.5	W1	W0.5			

名称	陶瓷	树脂	橡胶	金属
代号	A	S	X	J

硬度等级	超软	软 ₁	软 ₂	软 ₃	中软 ₁	中软 ₂	中 ₁	中 ₂
代号	CR	R ₁	R ₂	R ₃	ZR ₁	ZR ₂	Z ₁	Z ₂

硬度等级	中硬 ₁	中硬 ₂	中硬 ₃	硬 ₁	硬 ₂	超硬*		
代号	ZY ₁	ZY ₂	ZY ₃	Y ₁	Y ₂	OY		

组 织	类 别	紧 密				中 等				疏 松				
	组 织 号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	磨料占体积%	62	60	58	56	54	52	50	48	46	44	42	40	38

表示方法	举例:	GB	60	ZR ₂	A	P	D×H×d
		磨料	粒度	硬度	结合剂	形状	尺寸

* 对超硬砂轮还标明浓度,表示超硬磨粒重占砂轮单位体积中的比例,通常把 88 mg/cm³ 定为浓度 100。