



国际制造业先进技术译丛



磨削加工 技术难点与测量技术

研削加工の計測技術

塚本真也 著
[日] 大橋一仁 著
藤原貴典 著
姚鹏 姚文昊 译

非
外
借

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

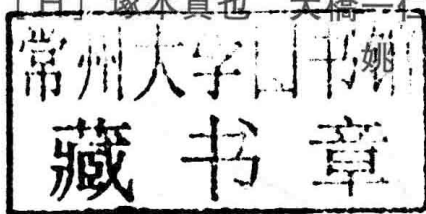


国际制造业先进技术译丛

磨削加工技术难点与测量技术

研削加工の計測技術

[日] 塚本真也 大橋一仁 藤原貴典 著
常州大学图书馆 姚文昊 译



机械工业出版社

研削加工の計測技術 最新の計測技術とそのノウハウ/塚本真也 大桥一仁 藤原贵典
共著/ISBN: 9784842503738

Copyright © 2005 by Yokendo

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means whatsoever without written permission from the publisher.

The Chinese edition Copyright © 2017 by China Machine Press.

This title is published in China by China Machine Press with license from 株式会社养贤堂. This edition is authorized for sale throughout the world. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书由株式会社养贤堂授权机械工业出版社在全球出版与发行。未经许可的出口，视为违反著作权法，将受法律制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2015-5229 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

磨削加工技术难点与测量技术/ (日) 塚本真也, (日) 大桥一仁, (日) 藤原贵典
著; 姚鹏, 姚文昊译. —北京: 机械工业出版社, 2017. 8

(国际制造业先进技术译丛)

ISBN 978-7-111-57980-9

I. ①磨… II. ①塚… ②大… ③藤… ④姚… ⑤姚… III. ①磨削-生产工艺-技术
测量 IV. ①TG580.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 221843 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: 贺 怡 责任编辑: 贺 怡

责任校对: 王明欣 封面设计: 鞠 杨

责任印制: 常天培

涿州市京南印刷厂印刷

2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 12.75 印张 · 235 千字

0001-1500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-57980-9

定价: 89.00 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

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

本书系统地介绍了磨削加工中测量与评价磨削力、磨削热、热变形、砂轮磨损和工件表面质量等磨削过程中涉及的物理量的相关理论和方法，既包括了传统的方法，又涵盖了最新的技术。区别于大部分磨削加工技术的书籍，本书详细介绍了这些测量和评价方法使用的设备、装置、难点及其解决方法与技巧，以大量的试验数据和分析结果为实例进行讲解，内容翔实，可操作性强。可以为开展磨削理论与技术研究的高校、科研院所和企业的研究人员，尤其是刚开始从事磨削加工技术研究的初学者提供有益的参考。

前 言

几年前，在我为某机床制造企业解决技术难题时，我建议该企业使用应变片测量磨削力，通过研究磨削力来解决生产中遇到的问题。但企业的工程师却表示他们从来没有成功地用应变片测量出磨削力。

于是，我推荐给他一本采用应变片测量磨削力的书籍。一个月后，我收到回复，由于噪声干扰无法获得有效数据，希望我再去指导。当我再去他们厂里时，惊讶地发现：粘贴在顶尖上的应变片并没有用保护膜覆盖；引线悬在空中，而且被磨削液直接冲淋。

通过这件事我明白了，要想进行正确的操作，仅明白测量的原理是不够的，还必须掌握很多测量的技巧。

近来又发现，即便是在以磨削加工为研究方向的研究室，在新学期开始的几个月里，学生研究报告中测量数据的质量也明显较差。例如工件的形状，由于热变形本来应该是中间凹下去的，可学生在提供结果时竟然说：“老师，我有重要的发现，工件的变形是中间凸出来的。”

这是因为在测量时表面粗糙度仪的触针没有正确地通过工件圆柱面的母线，才产生了这种简单的错误。

通过学生试验的失败，我发现关于测量技术有一些潜在的问题。那就是，在测量技术的教学中，我们就像传话游戏那样，在简化重要教学知识点的同时，还增添了一些不必要的赘述，然后一代代学长向师弟师妹传授时又不够完整和准确。

从上述两则实例可以发现，即使是一般测量技术也可能涉及以上的问题，而对于复杂现象交织在一起的磨削加工的测量技术，初学者仅仅是单纯地模仿论文或专业书籍上刊载的测量方法，想要获得准确的数据是非常困难的。其次，就算是经验丰富的人，对初学者进行传授与教学也并不容易。

到目前为止，还没有一本磨削书籍能将“感同身受”的那种微妙的技巧精细地描述出来，这恐怕是出现以上问题的最主要的原因吧。

以上，就是我执笔此书的动机。本书各章节对至今学术论文或专业书籍中没有记载的有关磨削加工测量的详细步骤与对应的方法进行了集中说明。

IV ■■■■■■ 磨削加工技术难点与测量技术 ■■■■■■

首先，本书针对学生和年轻的初级技术人员，以基本磨削物理量（如力、尺寸生成量、磨削温度、热变形量、表面粗糙度、砂轮磨耗量）的测量方法为核心，立足技术方法与技巧进行详细阐述，即使是初学者也能够准确地掌握与体会。为了防止初学者出现事故，在第12章中特别对磨削试验的步骤与安全措施进行了汇总说明，请先仔细阅读。

其次，面向作为中坚力量的技术人员，此书详细地介绍了有关工件的表面轮廓和加工变质层，以及砂轮表面形貌的最先进的测量技术，为研究开发提供了有效的方法。

此外，本书是在由养贤堂出版的《机械研究》杂志上刊载的连载讲座内容的基础上补充修订而成。

本书整理了到目前为止许多学者关于磨削加工测量技术的研究成果，执笔本书之际，还参考了很多的文献，在此对这些文献的作者表示衷心的感谢！

塚本真也

目 录

前 言

第1章 磨削力的产生机理及其在不同磨削方式下的形态	1
1.1 概述	1
1.2 磨粒的切削力	1
1.3 砂轮的磨削力	4
1.4 不同磨削方式下磨削力的产生机理	5
1.4.1 切入磨削方式	5
1.4.2 纵向磨削方式	6
1.4.3 缓进给磨削方式	8
1.4.4 角度磨削方式	10
1.4.5 正面磨削方式	11
1.5 小结	12
参考文献	12
第2章 磨削力的应变片测量技术及其技术难题的解决	13
2.1 概述	13
2.2 应变片法	13
2.2.1 中心式应变片法的原理	13
2.2.2 电桥电路的输出与干涉	15
2.2.3 应变片法的操作步骤	18
2.2.4 测量系统的构成与噪声数据处理方法	21
2.2.5 应变片位置的保护方法	22
2.3 磨削力的校准与数据处理	22
2.3.1 磨削力的校准方法	22
2.3.2 磨削力校准公式的确定	23
2.3.3 磨削力的数据处理	25
2.4 试验问题处理	26

2.4.1	振幅明显的数据	26
2.4.2	零点漂移	27
2.5	小结	28
	参考文献	28
第3章	磨削力分布的先进测量技术	29
3.1	概述	29
3.2	磨削力分布的测量方法(预制沟槽测力分析法)	29
3.2.1	外圆纵向磨削	29
3.2.2	磨削力分布的计算方法	31
3.2.3	缓进给磨削	34
3.2.4	角度磨削	36
3.2.5	磨削力分布的压力传感器测量法	38
3.3	其他的先进测量技术	41
3.4	小结	44
	参考文献	44
第4章	热电偶埋入测温法中磨削温度的测量技术与技巧	45
4.1	概述	45
4.2	产生磨削温度的机理	45
4.2.1	磨削温度的产生机理与定义	45
4.2.2	磨削温度的影响	46
4.3	热电偶埋入测温法	47
4.3.1	磨削温度测量法的种类	47
4.3.2	热电偶的原理	48
4.3.3	热电偶埋入测温法的使用技巧	49
4.3.4	磨削温度的测量系统	51
4.3.5	工件温度分布的测量方法	53
4.3.6	康铜线热电偶的热电动势检测	55
4.3.7	解析检测信号时需注意的问题	56
4.3.8	热电偶埋入测温法的噪声信号的解决方法	58
4.4	小结	60
	参考文献	61
第5章	应用接触式表面温度计的磨削温度测量技术	62
5.1	概述	62
5.2	应用接触式表面温度计测量温度	62

5.2.1	接触式表面温度计的构造及其测量原理	62
5.2.2	接触式表面温度计测量精度的校准	64
5.2.3	制作要点与技术难点的解决	66
5.2.4	存在温度梯度时的温度测量	68
5.3	红外温度计与红外热像仪	71
5.3.1	红外温度计测量温度的注意事项	71
5.3.2	红外热像仪测量温度的注意事项	73
5.4	小结	77
	参考文献	77
第6章	工件热变形的相关测量技术	78
6.1	概述	78
6.2	热变形量的快速退刀测量方法	78
6.2.1	热变形量的测量方法及其原理	78
6.2.2	工件圆周上的热变形量	81
6.2.3	磨削循环中的热变形量与尺寸精度	82
6.2.4	工件的热变形量与温度分布的关系	83
6.2.5	工件宽度方向上的热变形量和形状误差	83
6.2.6	内圆磨削中的热变形行为	84
6.2.7	平面磨削中快速后退测量法的方案	87
6.3	在线预测测量方法	88
6.3.1	测量原理与数据分析方法	88
6.3.2	加工参数的影响	90
6.3.3	在磨削加工现场的使用方法	92
6.4	小结	93
	参考文献	93
第7章	接触传感技术	94
7.1	概述	94
7.2	为提高加工效率而检测加工开始位置的必要性	94
7.3	发现隐藏数据背后的真相	96
7.4	接触式传感器的构成和间隔检测方法	97
7.5	接触传感功能的发现	99
7.6	接触式传感器的信号特征	103
7.7	实用型接触式传感器开发指南	106
7.8	小结	107

参考文献	107
第 8 章 使用表面粗糙度测量仪测量表面轮廓和砂轮磨耗量的方法	109
8.1 概述	109
8.2 三维表面形状的测量方法	109
8.3 在圆柱面轮廓测量中母线的确定方法	113
8.4 砂轮磨耗量的测量	117
8.4.1 利用转印法的测量方法	117
8.4.2 用转印法测量砂轮磨耗量的技巧	120
8.4.3 非接触测量法	122
8.5 小结	123
参考文献	123
第 9 章 砂轮架移动量、尺寸生成量以及残留余量的测量技术	124
9.1 概述	124
9.2 考虑热变形量的接触状态	124
9.3 砂轮架移动量和砂轮磨耗量	126
9.3.1 砂轮架移动量的测量	126
9.3.2 砂轮磨耗量的测量	129
9.4 由轴的刚度导致的磨削残留余量	130
9.4.1 砂轮轴刚度和工件轴刚度的测量	130
9.4.2 系统刚度的确定	132
9.4.3 磨削残留余量的在线测量	133
9.5 实际尺寸生成量的测量技术	134
9.6 与热变形量有关的实际磨削现象	136
9.6.1 砂轮和工件的热变形速度的变化规律	136
9.6.2 实际的砂轮架移动速度和尺寸生成速度	137
9.6.3 磨削区的磨削残留余量	138
9.7 小结	139
参考文献	140
第 10 章 使用显微镜进行加工表面的观察与特性评价的技术	141
10.1 概述	141
10.2 各种显微镜的观察特点	142
10.3 利用转印法观察已加工表面	144
10.4 利用 SEM 进行的对已加工表面特性的定量评价法	146
10.5 已加工表面的特性与加工变质层的评价方法	149

10.5.1 通过光泽度评价	149
10.5.2 根据硬度评价	155
10.6 小结	159
参考文献	159
第 11 章 砂轮表面观察技术和砂轮接触形态的解析技术	160
11.1 概述	160
11.2 使用转印法的砂轮表面观察技术	160
11.3 砂轮接触形态的评价技术	165
11.3.1 利用激光位移传感器的砂轮表面形貌测量系统	165
11.3.2 确定同时作用切削刃数量的简单方法	168
11.4 小结	173
参考文献	174
第 12 章 磨削试验步骤与安全措施	175
12.1 概述	175
12.2 磨削试验的注意要点	176
12.2.1 磨削试验的基本顺序	176
12.2.2 砂轮的装卸	177
12.2.3 调整砂轮平衡	178
12.2.4 确定砂轮和工件接触开始处位置的方法	179
12.2.5 测量数据的分辨率	181
12.2.6 稳定的数据输出	183
12.3 事故案例	184
12.3.1 磨床前的操作	184
12.3.2 使用切断砂轮	186
12.3.3 平面磨削操作	187
12.3.4 平面磨削结束后	187
12.3.5 数控磨床的操作	188
12.3.6 变频器的连接	189
12.3.7 工作台与砂轮头架的自动进给	190
12.4 小结	191
参考文献	191

第1章

磨削力的产生机理及其在不同磨削方式下的形态

1.1 概述

磨削力是磨削加工中最基本的输出信号，几乎从根本上影响了所有磨削现象。那么磨削力究竟是什么呢？一言以蔽之，磨削力就是砂轮磨削工件时所产生的力。然而这种表达方式无法使人们充分理解磨削力的重要性。本书在后续的论述中，将指出人们对磨削力的理解一直存在的诸多误区。

本章将阐述磨削力的产生机理，并基于不同的磨削方式对磨削力的发生形态进行系统的分类。同时也希望读者能深刻理解第2章及后续章节中所介绍的具体测量技术的重要性和测量目的。

1.2 磨粒的切削力

图1-1所示为传统磨削理论一直采用的基于单颗磨粒的切削力产生机理^[1]。由于磨粒形状的不确定性，解析计算相当困难，因此采用了圆锥形磨粒的切削模型。此模型就是具有 α 负前角的二维切削模型，形成剪切面的圆锥磨粒切削刃会产生切削力 w_g ，可推测此过程中将 w_g 沿磨削速度方向和与之垂直的方向分别分解成的主切削力 q_g 的背向力 p_g 。

图1-1的模型并没有明显的错误，然而此二维模型并不能解释所有磨粒切削现象。例如，细致分析会发现磨粒的切削槽并不是一条完全的直线，在磨粒的厚度方向，即在垂直于图1-1所在平面方向上发生蛇形运动现象^[2]。因此，理论上沿磨粒厚度方向也可能产生磨削力。

本章试图从图1-1所示的传统理论中继续深入，重新构建磨削力产生的机

理,如图 1-2 所示。首先磨粒切入工件中,然后在磨粒和工件的接触区,即图示的黑色阴影区域产生磨削力。实际上,磨削力在垂直纸(平)面的方向上也有分布,即像头巾包裹磨粒一样在三维空间内呈立体分布。

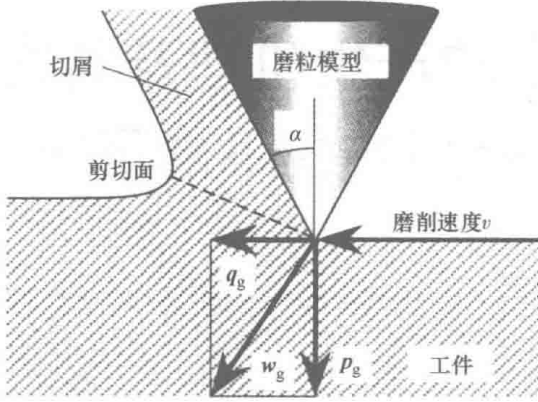


图 1-1 传统理论中磨粒模型上产生的磨削力^[1]

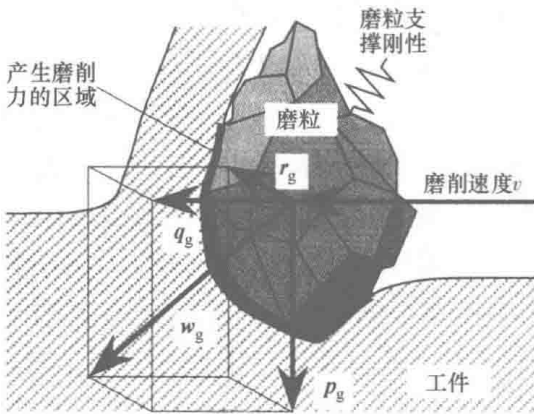


图 1-2 磨粒的磨削力发生机理

另外,虽然由于缺乏实际测量值无法定量说明磨粒与工件接触部分磨削力分布,但是可以把磨粒的各个结晶面看作切削工具(刀具)的前刀面进行复杂的三维切削。也就是说,与工件接触的磨粒结晶面,会产生各自相对应的磨削力。这些力的方向呈三维分布,就像无数个针扎在前面提到的那个头巾上那样。

作为磨削的结果,切屑和切削沟槽是工件受磨粒结晶面的切削力作用而形成的。然而,由于现阶段磨粒结晶面分布形态未知,所以只能将图 1-2 中各结晶面上的磨削力矢量和 w_g , 即所示的磨削合力, 视作是整颗磨粒的作用。此处应注意的是合力 w_g 并不是严格作用在切削速度 v 所在的平面上, 而是沿着图 1-2

中长方体对顶角所对应的三维矢量方向作用的。

由于磨粒的形状是立体的，并且磨粒将与前方沟槽的不同部位发生干涉（后文将介绍），这些原因都将会影响此合力 w_g 的作用方向，所以直接计算 w_g 是非常困难的。因此，将合力 w_g 分解为沿磨削速度方向的主切削力 q_g 和与之垂直的背向力 p_g ，以及垂直于前两者的宽度方向的分力 r_g 这三个分力，从而对磨粒产生的切削力进行进一步解析计算。

如上所述，虽然未实际测出磨粒上的三个分力，但是对于圆锥形金刚石磨粒模型，如图 1-3 所示那样进行具体计算是可行的。在这个试验模型中，圆锥形磨粒与前方沟槽的右侧壁干涉。这与实际磨削加工中的情况完全相同。磨粒是在与前方沟槽的左右某个侧壁发生干涉的同时进行切削工作的。而且，即使磨粒不是与沟槽一边的侧壁干涉，沿磨削前进方向的磨粒与沟槽左右边的干涉面积也肯定不同，所以一定会产生如图 1-3 所示的宽度方向分力 r_g 。一般而言，因为磨粒有较大的负前角，可以推测 q_g 、 p_g 、 r_g 三者大小关系应该是 $p_g > q_g > r_g$ 。

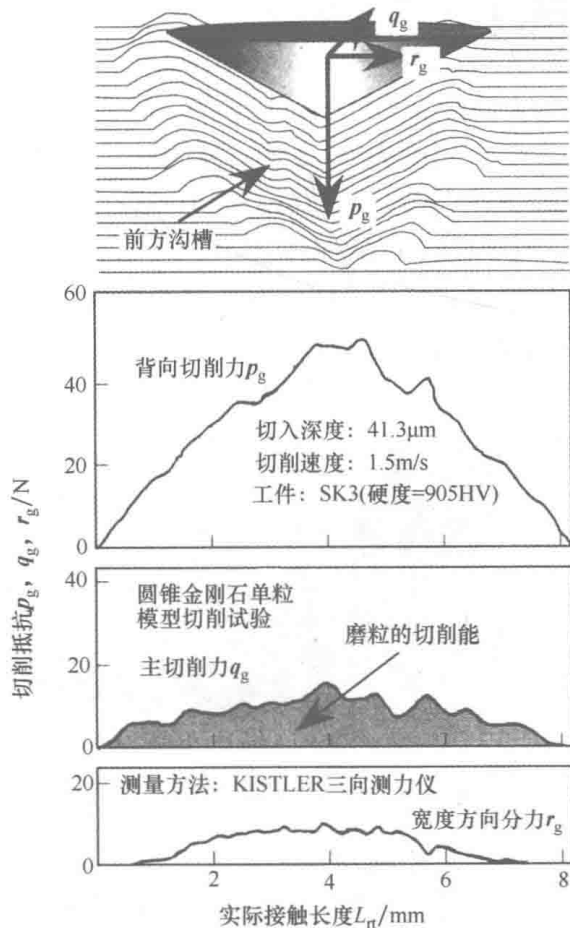


图 1-3 磨粒模型中磨削力的三个分力

继续研究磨粒切削沟槽消耗的能量。根据能量守恒定律，能量 = 功 = 物体移动距离 × 沿移动方向的作用力。根据此定律，由于切削分力 p_g 和宽度方向分力 r_g ，分别在切削沟槽的深度方向和宽度方向对工件作用，从原理上都会因为使工件材料（物体）发生移动而产生能量。图 1-3 中实际接触弧长 L_n 的长度在毫米量级，远大于数微米的切削沟槽深度以及十几微米的切削沟槽蛇行量。因此设磨粒切削能量是 E_g 。使用式 (1-1) 来表达 E_g ，误差几乎可以完全忽略

$$E_g = \int q_g dL_n \quad (1-1)$$

所得结果即图中阴影区域所示面积。对 E_g 在时间上求导数，即得到单位时间 (dt) 下的切削能量 = 切削功率 U_g ，由式 (1-2) 所求

$$U_g = \frac{dE_g}{dt} = \frac{d\left(\int q_g dL_n\right)}{dt} = q_g v \quad (1-2)$$

1.3 砂轮的磨削力

图 1-4 所示为砂轮上磨削力的产生机理模型。在传统磨削理论中，将砂轮和工件作用区域内各磨粒产生切削力 w_g 之和，即 Σw_g 作为磨削力的合力 w 。并将此 w 分解为三个相互垂直的分力：沿切削方向的主磨削力 q ，沿砂轮宽度方向的分力 r 以及与前两个分力相垂直的背向力 p 。将三个分力看作是作用于砂轮与工件干涉区域内一点的集中载荷。在上述的磨削力理论中，当图 1-4 中的实际接触弧长 L_n 与实际切削深度 Δ' 很小的时候，不会产生较大的误差。

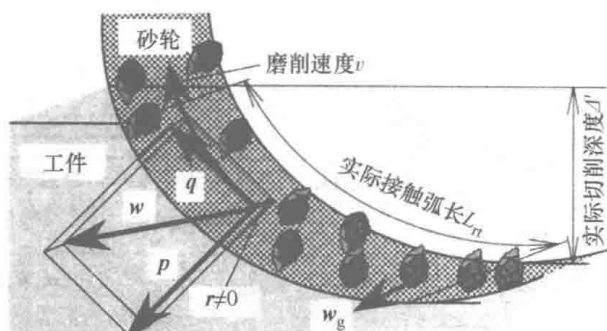


图 1-4 砂轮上产生的磨削力

然而，像下面将要详细阐述的，在纵向磨削和缓进给磨削时，砂轮与工件形成的磨削区很宽，此时如果将磨削区内的磨削力看成是一个点上的集中载荷，即磨削合力 w ，就很难准确地分析磨削现象。

进而分析图 1-4 中在磨削区产生的砂轮宽度方向上的分力 r 。当然，我们将

此 r 看作多个磨粒在砂轮宽度方向上所产生的各个分力 r_g 的总和。然而，沿砂轮宽度方向产生的各自的 r_g ，会根据前方的沟槽及其干涉状态，随机存在着沿纸面向内作用的磨粒以及朝向读者方向作用的磨粒。

然而，由于同时作用于磨削区的磨粒一般为数十个到数百个不等，即使将宽度方向分力考虑为无限接近 0，也会产生较大影响。所以，很容易认为 r 不是对磨削现象没有影响， r 会造成砂轮轴向的振动以及如前面所述的切削出蛇形的沟槽。

1.4 不同磨削方式下磨削力的产生机理

1.4.1 切入磨削方式

图 1-5 所示为切入磨削中磨削力的发生形态。在切入磨削中，不论是外圆磨、平面磨还是内圆磨，砂轮面上产生的磨削力只有主分力 q 和背向力 p 两种。对于砂轮宽度方向上的分力 r ，若像上一节所述的那样精密测量的话可以测出脉冲状的数据，但一般情况下是可以忽略的。

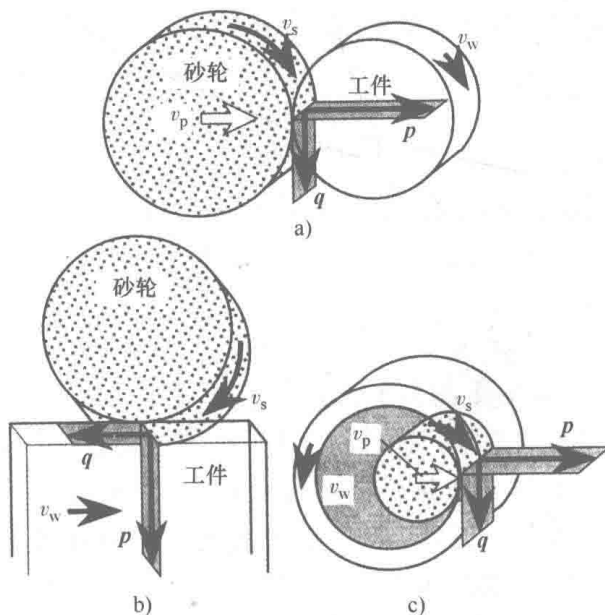


图 1-5 切入磨削中产生的磨削力

a) 外圆切入磨削 b) 平面切入磨削 c) 内圆磨削

同时，磨削力用带状表示是因为切入磨削时砂轮宽度方向的磨削力是大致均匀分布的。所谓“大致均匀”是指，磨削过程中会出现工件中间部分磨削深度稍深一些（图 1-6），通过磨削液冷却性的观点考虑工件温度分布的影响，从

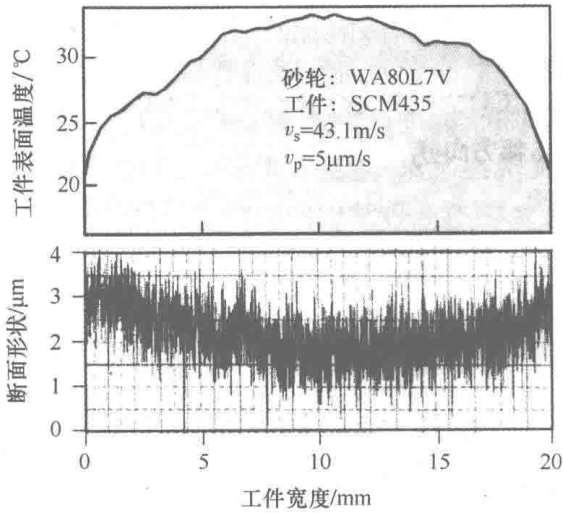


图 1-6 切入磨削中宽度方向断面形状以及工件表面温度

理论上推测磨削力的分布，应是砂轮中央部位的磨削力最大。

然而，由于切入磨削中砂轮宽度方向的磨削力分布会被数据噪声成分埋没，目前并无测量成功的数据报告。

磨削加工中的磨削能量 E ，是包含在式 (1-1) 中磨粒的切削能量 E_g 的总和，设磨削时间为 t ，则有

$$E = \int qv dt \quad (1-3)$$

式 (1-3) 中，磨削速度 v 是由砂轮的圆周速度 v_s 和工件的圆周速度 v_w （在平面磨削时是工件的移动速度）求矢量和得到的砂轮面与工件结合面上工件与砂轮的相对速度。即

$$v = v_s \pm v_w \quad (1-4)$$

式 (1-4) 中，+ 表示磨削方向向上，- 表示向下。

查阅以往的磨削专业书籍，往往将 (1-3) 的磨削能量用 $E = qv$ 来表示。通过量纲分析可知， qv 的单位是 $N \cdot m/s = J/s = W$ ，而不是 $N \cdot m = J$ ，所以 qv 并不能表示磨削能量。本节中式 (1-3) 是对磨削过程的时间 t 积分后的总能量，而以往表示方法的运算结果是本节式 (1-3) 在时间上求导，也就是成了瞬态问题的求解。因此，将磨削功率 U （单位时间消耗的磨削能）表示为式 (1-5) 更为贴切。

$$U = qv \quad (1-5)$$

1.4.2 纵向磨削方式

图 1-7a 所示为传统理论中外圆纵向磨削时磨削力的产生形态。纵向磨削时，