

MECHANISM AND THEORETICAL STUDY
OF ULTRASONIC VIBRATION ASSISTED GRINDING

超声振动 **辅助** 磨削

加工机理及理论研究

 张洪丽 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

超声振动辅助磨削加工机理及 理论研究

张洪丽 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书是在传统机械加工的基础上,针对硬脆性难加工材料的特点及传统加工过程中难以解决的一系列难题,提出超声振动辅助磨削加工技术,并对此展开理论研究、试验验证及推广应用推广。本书共分为六章,主要内容包括:超声振动辅助磨削加工装置、超声振动辅助磨削运动学分析、超声振动辅助磨削加工磨削力研究、超声振动辅助磨削材料去除机理研究和超声振动辅助磨削加工表面质量研究。本书理论结合试验,全面、系统地讲述了超声振动辅助磨削加工技术的理论推导与试验验证;强调理论知识的逻辑性、实用性和完整性,突出加工技术的加工机理及理论研究。

本书可作为广大工程技术人员及高校学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

超声振动辅助磨削加工机理及理论研究 / 张洪丽著

— 北京:中国水利水电出版社,2018.10

ISBN 978-7-5170-6960-7

I. ①超… II. ①张… III. ①超声波振动—应用—磨削—金属加工—研究 IV. ①TG58

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第232408号

策划编辑:杜威 责任编辑:张玉玲 加工编辑:王开云 封面设计:李佳

| | |
|------|---|
| 书 名 | 超声振动辅助磨削加工机理及理论研究 |
| 作 者 | 张洪丽 著 |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail:mchannel@263.net(万水) sales@waterpub.com.cn |
| 经 售 | 电话:(010)68367658(营销中心)、82562819 全国各地新华书店和相关出版物销售网点 |
| 排 版 | 北京万水电子信息有限公司 |
| 印 刷 | 三河市元兴印务有限公司 |
| 规 格 | 170mm×240mm 16开本 11.5印张 209千字 |
| 版 次 | 2018年10月第1版 2018年10月第1次印刷 |
| 印 数 | 0001—2000册 |
| 定 价 | 46.00元 |



凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

前 言

随着科学技术的快速发展，航空航天、军工、船舶等行业对产品的制造精度和质量提出越来越高的要求；随着新型高性能材料以及复杂结构零部件的广泛应用，传统机械加工技术面临巨大的挑战。为了满足生产加工的需求，超声辅助加工技术作为一种复合加工技术，在难加工材料、异形结构、精密加工等高精尖应用领域的应用越来越广泛，对该技术进行系统的研究也变得越来越重要。在我国曾有相关的书籍，但研究内容比较分散且各有侧重点、缺乏系统性。因此，作者编著了一本内容新颖并具有理论意义的超声振动辅助磨削加工方面的参考书。

本书共分为六章，主要包括：超声振动辅助磨削加工装置、超声振动辅助磨削运动学分析、超声振动辅助磨削加工磨削力研究、超声振动辅助磨削材料去除机理研究和超声振动辅助磨削加工表面质量研究。

本书套言不陈，勇于创新，力求内容精湛、新颖、切合实用，其内容多为作者近年来发表的一些研究成果，并吸收了国内外同行的研究成果，重点阐述了超声振动辅助磨削加工机理及理论。在本书的研究和形成过程中，得到了张建华老师的悉心指导、家人的大力支持和单位同事的帮助，衷心感谢敬爱的、亲爱的您给予我陈述个人观点和见解的勇气。

由于作者水平和能力有限，加之时间仓促，书中难免有疏漏之处，殷切希望专家和广大读者批评指正。

作 者
2018年5月

符号说明

- v_w —— 工件速度
 v_s —— 砂轮线速度
 d_s —— 砂轮直径
 A —— 超声振动振幅
 f —— 超声振动频率
 ω —— 超声振动角频率
 T —— 超声振动周期
 ϕ_0 —— 砂轮超声振动的初相位
 v_{vmax} —— 最大振动速度
 K —— 速度系数
 t_1 —— 切向超声振动辅助磨削时, 工件开始远离砂轮时刻
 t'_1 —— 切向超声振动辅助磨削时, 工件速度与砂轮振动速度相同时刻
 t_2 —— 切向超声振动辅助磨削时, 工件开始接触砂轮时刻
 x_m —— 净磨削时间内砂轮相对工件水平移动距离
 x_0 —— 分离时间内砂轮远离工件的最大距离
 Δt —— 单颗磨粒切入切出磨削区所用时间
 a_p —— 磨削深度
 l_{gtT} —— 切向超声振动辅助磨削单颗磨粒在一个振动周期内的运动路径长度
 l_{gtz} —— 切向超声振动辅助磨削单颗磨粒在磨削区内的运动路径长度
 l_{gtm} —— 切向超声振动辅助磨削单颗磨粒净磨削切削路径长度
 l —— 普通磨削单颗磨粒在磨削区内的切削路径长度
 ϕ_0 —— 单颗磨粒进入磨削区的振动相位
 a —— 砂轮表面连续切削刃间距
 δ —— 磨粒半顶锥角
 v_l —— 分离型切向超声振动辅助磨削理论临界切削速度
 v_c —— 分离型切向超声振动辅助磨削实际临界切削速度
 t'_1 —— 单颗磨粒与工件分离时刻

- t'_m —— 单颗磨粒的净磨削时间
 t'_0 —— 单颗磨粒与工件分离时间
 F_t —— 切向磨削力
 F_n —— 法向磨削力
 F_a —— 轴向磨削力
 l_{ga} —— 轴向超声振动辅助磨削单颗磨粒在磨削区的运动路径长度
 A_m —— 超声振动辅助磨削单颗磨粒平均切屑断面面积
 N_{ds} —— 动态磨粒分布密度
 N_d —— 磨削区内有效磨粒数
 A'_m —— 普通磨削单颗磨粒的平均切屑断面面积
 v_a —— 内圆轴向超声振动辅助磨削的临界速度
 l_{gn} —— 法向超声振动辅助磨削单颗磨粒在磨削区的运动路径长度
 F_{tc} —— 切削变形引起的切向力
 F_{nc} —— 切削变形引起的径向力
 F_{ts} —— 滑擦引起的切向力
 F_{ns} —— 滑擦引起的径向力
 F_{gtc} —— 单颗磨粒上切削变形引起的切向力
 F_{gnc} —— 单颗磨粒上切削变形引起的径向力
 F_{gts} —— 单颗磨粒上滑擦引起的切向力
 F_{gns} —— 单颗磨粒上滑擦引起的径向力
 F_u —— 普通磨削单位磨削力
 F_{tu} —— 切向超声振动辅助磨削单位磨削力
 F_{nu} —— 法向超声振动辅助磨削单位磨削力
 μ —— 摩擦系数
 ρ_{st} —— 单颗磨粒在 t 时刻与工件接触母线长度
 a_{gt} —— 单颗磨粒在 t 时刻的切削深度
 a_{gmax} —— 单颗磨粒在磨削区的最大切削深度
 \bar{a}_g —— 普通磨削单颗磨粒的平均切削深度
 a_{ga} —— 轴向超声振动辅助磨削单颗磨粒的切削深度
 \bar{F}_{gt} —— 普通磨削单颗磨粒的切向平均磨削力
 \bar{F}_{gn} —— 普通磨削单颗磨粒的法向平均磨削力

- a_{tgt} —— 切向超声振动辅助磨削单颗磨粒在 t 时刻的切削深度
 \bar{a}_{tg} —— 切向超声振动辅助磨削单颗磨粒的平均切削深度
 \bar{F}_{tgt} —— 切向超声振动辅助磨削单颗磨粒的切向平均磨削力
 \bar{F}_{tgn} —— 切向超声振动辅助磨削单颗磨粒的法向平均磨削力
 η —— 总磨削力降低率
 a_{ngt} —— 法向超声振动辅助磨削单颗磨粒在 t 时刻的切削深度
 \bar{F}_{ngt} —— 法向超声振动辅助磨削单颗磨粒的切向平均磨削力
 \bar{F}_{ngn} —— 法向超声振动辅助磨削单颗磨粒的法向平均磨削力
 C_{gc} —— 磨削能力参数, $C_{\text{gc}} = A_{\text{m}}/F_{\text{gn}}$
 c —— 压痕特征尺寸
 a_{gc} —— 塑性磨削单颗磨粒临界切削深度
 R_{ap} —— 普通磨削沿磨削方向的加工表面粗糙度
 R_{av} —— 普通磨削垂直磨削方向的加工表面粗糙度
 R_{a} —— 普通磨削加工表面粗糙度
 R_{tap} —— 切向超声振动辅助磨削沿磨削方向的加工表面粗糙度
 R_{tav} —— 切向超声振动辅助磨削垂直磨削方向的加工表面粗糙度
 R_{ta} —— 切向超声振动辅助磨削加工表面粗糙度
 R_{aa} —— 轴向超声振动辅助磨削加工表面粗糙度
 R_{nap} —— 法向超声振动辅助磨削沿磨削方向的加工表面粗糙度
 R_{nav} —— 法向超声振动辅助磨削垂直磨削方向的加工表面粗糙度
 R_{na} —— 法向超声振动辅助磨削加工表面粗糙度

目 录

前言

符号说明

| | |
|------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 超声波加工的发展与应用 | 1 |
| 1.1.1 超声波加工的原理 | 2 |
| 1.1.2 超声波加工的特点 | 3 |
| 1.1.3 超声波加工的应用 | 4 |
| 1.2 旋转超声波加工及其特点 | 4 |
| 1.3 磨削加工的发展与研究 | 5 |
| 1.3.1 磨削加工的类型 | 5 |
| 1.3.2 磨削加工的发展历程 | 8 |
| 1.3.3 磨削加工材料去除的研究 | 8 |
| 1.3.4 磨削加工的特点 | 9 |
| 1.4 硬脆性材料精密加工技术的研究现状 | 10 |
| 1.4.1 硬脆性材料加工理论的研究现状 | 10 |
| 1.4.2 硬脆性材料去除机理 | 12 |
| 1.4.3 硬脆性材料的精密加工方法 | 14 |
| 1.5 超声振动辅助加工技术的发展及应用 | 16 |
| 1.6 超声振动辅助磨削技术发展 | 17 |
| 第 2 章 超声振动辅助磨削加工装置 | 23 |
| 2.1 超声振动辅助磨削加工试验装备整体设计 | 23 |
| 2.2 超声振动系统设计 | 24 |
| 2.3 超声波频率的选择 | 25 |
| 2.4 超声波电源的选用 | 27 |
| 2.5 换能器的选用 | 27 |
| 2.6 变幅杆的选用及设计计算 | 28 |
| 2.7 变幅杆设计理论 | 29 |
| 2.7.1 变幅杆设计概述 | 29 |
| 2.7.2 变截面纵振动的波动方程 | 30 |
| 2.8 指数形变幅杆的理论计算 | 31 |
| 2.8.1 指数形变幅杆频率方程和谐振长度 | 32 |

| | | |
|------------|-------------------------------|------------|
| 2.8.2 | 指数形变幅杆的位移节点 x_0 | 33 |
| 2.8.3 | 指数形变幅杆的放大系数 M_p | 33 |
| 2.8.4 | 指数形变幅杆的设计计算 | 34 |
| 2.9 | 圆锥形变幅杆的理论计算 | 34 |
| 2.9.1 | 圆锥形变幅杆的频率方程和谐振长度 | 35 |
| 2.9.2 | 圆锥形变幅杆的位移节点 x_0 | 35 |
| 2.9.3 | 圆锥形变幅杆的放大系数 M_p | 36 |
| 2.9.4 | 圆锥形变幅杆的计算 | 36 |
| 2.10 | 阶梯形变幅杆的理论计算 | 36 |
| 2.10.1 | 阶梯形变幅杆的位移节点 x_0 | 37 |
| 2.10.2 | 阶梯形变幅杆的放大系数 M_p | 38 |
| 2.10.3 | 阶梯形变幅杆的计算 | 38 |
| 第3章 | 超声振动辅助磨削运动学分析 | 39 |
| 3.1 | 超声振动辅助磨削加工的类型 | 39 |
| 3.2 | 切向超声振动辅助磨削 | 40 |
| 3.2.1 | 砂轮—工件运动分析 | 40 |
| 3.2.2 | 单颗磨粒—工件运动分析 | 43 |
| 3.3 | 轴向超声振动辅助磨削 | 57 |
| 3.3.1 | 单颗磨粒切削过程与几何参数分析计算 | 57 |
| 3.3.2 | 轴向超声振动辅助磨削临界速度 | 59 |
| 3.4 | 径向超声振动辅助磨削 | 61 |
| 3.4.1 | 砂轮—工件运动分析 | 61 |
| 3.4.2 | 单颗磨粒—工件运动分析 | 61 |
| 3.5 | 小结 | 65 |
| 第4章 | 超声振动辅助磨削加工磨削力研究 | 67 |
| 4.1 | 磨削力数学模型 | 72 |
| 4.1.1 | 切削变形力 | 72 |
| 4.1.2 | 摩擦力 | 87 |
| 4.2 | 磨削力的试验研究 | 92 |
| 4.2.1 | 试验方案 | 92 |
| 4.2.2 | 试验结果及分析 | 93 |
| 4.3 | 小结 | 99 |
| 第5章 | 超声振动辅助磨削材料去除机理研究 | 101 |
| 5.1 | 超声振动辅助磨削材料去除机理试验研究 | 102 |
| 5.1.1 | 试验装置与方法 | 102 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 5.1.2 | 试验结果分析 | 104 |
| 5.2 | 超声振动辅助磨削脆性材料的脆-塑性转变临界条件 | 110 |
| 5.2.1 | 脆-塑性转变临界条件理论分析 | 111 |
| 5.2.2 | 不同超声振动方式对脆-塑性转变临界条件的影响 | 113 |
| 5.3 | 小结 | 113 |
| 第6章 | 超声振动辅助磨削加工表面质量研究 | 115 |
| 6.1 | 加工表面粗糙度理论分析 | 116 |
| 6.1.1 | 普通磨削 | 116 |
| 6.1.2 | 切向超声振动辅助磨削 | 121 |
| 6.1.3 | 轴向超声振动辅助磨削 | 124 |
| 6.1.4 | 径向超声振动辅助磨削 | 127 |
| 6.2 | 加工表面粗糙度的试验研究 | 133 |
| 6.2.1 | 试验方案 | 133 |
| 6.2.2 | 试验结果 | 134 |
| 6.3 | 讨论 | 138 |
| 6.4 | 加工亚表面分析 | 139 |
| 6.5 | 加工表面显微硬度变化 | 140 |
| 6.6 | 小结 | 141 |
| 结论 | | 143 |
| 附录 | 有代表性的英文文章 | 146 |
| | Study on Ultrasonic Vibration Assisted Grinding in Theory | 146 |
| | Kinematics Analysis of Ultrasonic Vibration Assisted Grinding | 154 |
| 参考文献 | | 161 |

第 1 章 绪论

1.1 超声波加工的发展与应用

1927 年, 美国物理学家 R Wood 和 A.E.Loomis 最早作了超声加工试验, 利用强烈的超声振动对玻璃板进行雕刻和快速钻孔, 但当时并未应用在工业上; 1951 年, 美国的科恩制成第一台实用的超声加工机。20 世纪 50 年代中期, 日本、苏联将超声加工与电加工 (如电火花加工和电解加工等)、切削加工结合起来, 开辟了复合加工的领域。这种复合加工的方法能改善电加工或金属切削加工的条件, 提高加工效率和质量。1964 年, 英国又提出使用烧结或电镀金刚石工具的超声旋转加工的方法, 克服了一般超声加工深孔时, 加工速度低和精度差的缺点。

20 世纪 70 年代之前, 超声波加工工具主要是与磁致伸缩换能器配套使用, 从 1970 年开始, 随着压电材料用于超声波换能器, 超声波加工技术有了很大进展。压电换能器使振动振幅能精确控制, 电声转换效率高达 96%, 对于硬脆材料的精加工, 如钻孔, 超声波加工工具可以加工 0.0125mm 的小孔。自 80 年代以后, 新的合成材料和陶瓷材料进展很快, 促进了超声波加工技术的发展。当电火花 (Electron Discharge Machining, EDM) 出现后, 它代替了超声波加工硬的钢铁, 效率更高, 被应用到许多场合中。80 年代中期, 随着电火花线切割的成功进展, 减少了超声波加工硬质合金的市场, 超声波加工的主要应用转变为切割玻璃、石英、陶瓷和硅板等低导电性的硬脆材料, 这些材料一般不能用 EDM 加工。后来, 力传感器和计算机数控伺服机构被应用于加工工具, 使超声波加工中的加工压力变得稳定可控。

我国超声波的研究始于 20 世纪 50 年代末, 曾经掀起过一阵群众性的“超声热”, 由于当时超声波发生器、换能器、声振系统很不成熟, 缺乏合理的组织和持

续的研究工作，很快就冷了下来。60年代末，哈尔滨工业大学应用超声车削，加工了一批飞机上的铝制细长轴，取得了良好的切削效果。1976年以后，我国再次开展超声试验研究和理论探讨工作。到1993年为止，我国已发表了300多篇有关超声加工方面的科学研究论文。可以相信，随着超声加工设备的不断完善和理论研究的不断深入，它必将在我国技术进步和社会主义现代化建设中起到重要作用。

超声波加工是近几十年来逐步发展和应用的一种新型加工方法，不仅能加工硬质合金、淬火钢等硬脆金属材料，而且更适合于半导体和不导电的非金属硬脆性材料（如半导体硅片、锗片以及陶瓷、玻璃等）的精密加工和成型加工^[1-4]。在难加工材料的精密加工中，超声波加工具有普通加工方法无法比拟的工艺效果，具有广泛的应用范围。

1.1.1 超声波加工的原理

超声波加工是利用工具端面作超声振动，通过磨料悬浮液加工脆性材料的一种成型加工方法，加工原理如图1-1所示^[1]。加工过程中，通过高频振动，工具端面把能量传递到磨料悬浮液，使磨粒不断冲击工件，实现材料的去除。

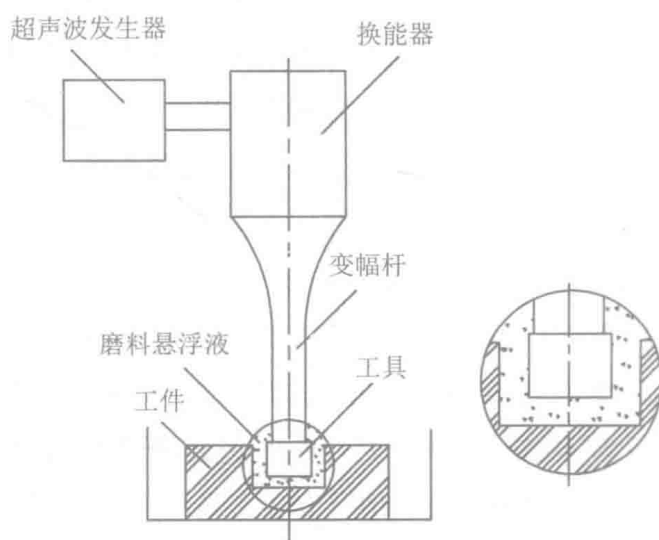


图 1-1 超声波加工原理图

超声波发生器产生 16~25kHz 的高频电信号，经换能器转换为机械振动，此

机械振动的振幅很小，不能直接用于加工，需要通过变幅杆（又称为聚能器）将其放大到约 0.01~0.1mm，再传给工具。工具一般通过焊接或细牙螺纹连接在变幅杆的下端，在工具端面和工件之间充满液体（水或煤油等）与磨料（碳化硅或碳化硼等）混合的磨料悬浮液。工具以一定的压力作用在工件上，工作液中悬浮的磨料颗粒在工具端面的超声振动作用下，以很高的速度和加速度不断冲击抛磨工件表面。磨料打击工件表面的加速度可达重力加速度的几千甚至几万倍，因而，在被加工表面上产生很大的局部单位面积压力，使工件微细局部材料发生变形；当产生的压力达到其强度极限时，材料将发生微细局部破坏，被粉碎成特别细小的微粒，并被循环的磨料悬浮液带走。

与此同时，磨料悬浮工作液受工具端面的超声振动作用而产生液压冲击和空化作用。空化作用是指当工具端面以很大的加速度离开工件表面时，加工间隙内形成负压和局部真空，在工作液体内形成很多微空腔，促使工作液渗入被加工工件表面材料的微裂纹处。当工具端面以很大的加速度接近工件表面时，空腔闭合，引起极强的液压冲击波，加速磨料对工件表面的微细破碎作用。随着磨料悬浮液不断的循环，磨粒的不断更新，加工下来的微细碎屑不断被排除。综上所述，在游离磨料的冲击、抛磨和磨料悬浮液空化腐蚀的综合作用下，最终在工件上加工出与工具几何形状相对应的型腔^[5]。

1.1.2 超声波加工的特点

超声波加工具有以下特点^[1,5]：

(1) 适用于加工各种硬脆材料，尤其是玻璃、陶瓷、石墨等不导电的非金属材料，也可以加工淬火钢、硬质合金等硬质或耐热导电的金属材料。被加工材料的脆性越大越容易加工，材料的硬度、强度、韧性越大则越难加工。

(2) 适合于加工形状复杂的型腔及型面。由于工件材料的去除主要靠磨料的冲击作用，磨料的硬度应比被加工材料的硬度高，而工具的硬度可以低于工件材料，而且不需要工具与工件作复杂的相对运动，因此，超声波加工可以加工出各种复杂的型腔和型面。

(3) 工件在加工过程中受力小，加工精度高。由于加工过程中材料去除主要

依靠磨粒瞬时局部的冲击作用,故工件表面的宏观切削力很小,切削应力、切削热更小,不会产生变形及烧伤,表面粗糙度也较低, R_a 可达 $0.63\sim 0.08\mu\text{m}$,尺寸精度可达 0.03mm ,适于加工薄壁、窄缝、低刚度等零件。

(4) 超声波加工可以与其他传统或特种加工结合应用,如超声振动切削、超声振动磨削、超声电火花复合加工和超声电解复合加工等,充分发挥其优点。

(5) 与电解加工、电火花加工等相比,超声波加工的效率较低。随着加工深度的增加,材料去除率下降,并且加工过程中工具的磨损较大。

1.1.3 超声波加工的应用

工业上,超声波应用可以分为加工和非加工两大类。加工方面的应用主要包括传统的超声波加工(Ultrasonic Machining, USM)、金刚石工具的旋转超声波加工(Rotary Ultrasonic Machining, RUM)、各种超声波复合加工等^[6,7]。非加工应用包括:清洗、塑料焊接、金属焊接、超声分散、化学处理、塑料金属成型和无损检测等^[1,8-9]。表 1-1 列出了超声波在工业上的主要应用范围。

表 1-1 超声波的一些工业应用

| 分类 | 原理及应用 |
|----------|---|
| 超声材料去除加工 | USM, RUM, 超声辅助电火花、激光加工, 超声辅助钻削、车削、磨削、珩磨、铰孔、除毛刺、切槽、雕刻等 |
| 超声表面光整加工 | 超声抛光、超声珩磨、超声砂带抛光、超声压光、超声珩齿 |
| 超声复合加工 | 超声电火花复合加工, 超声电解复合加工 |
| 其他应用 | 超声焊接、超声清洗、超声电镀、超声处理 |

1.2 旋转超声波加工及其特点

旋转超声波加工(RUM)是在传统超声波加工的基础上发展起来的,它与传统超声波加工,不同之处在于:工具在作超声振动的同时附加了旋转运动;工具由金属粉末和人造金刚石或立方氮化硼磨料按一定比例烧结而成;将冷却水而不是磨料悬浮液输入到工具和工件表面之间。这种加工方法把金刚石工具的优良切削性能和工具的超声频振动结合在一起,与传统超声波加工相比,具有以下优点:

- (1) 加工速度快。
- (2) 加工精度高。
- (3) 工具磨损小。
- (4) 对加工材料的适应性广。

1.3 磨削加工的发展与研究

磨削加工是一种历史悠久、应用广泛的精密加工方法，是用硬磨料颗粒作为切削工具进行加工的加工过程总称，包括游离磨料磨削和固结磨粒磨削^[10]。这里主要介绍固结磨粒磨削。固结磨粒磨削加工一般是利用高速旋转的砂轮等磨具加工工件表面，用于加工各种工件的内外圆柱面、圆锥面和平面，以及螺纹、齿轮和花键等特殊、复杂的成型表面。磨削由于磨粒的硬度很高，磨具具有自锐性，磨削可以用于加工各种材料，包括淬硬钢、高强度合金钢、硬质合金、玻璃、陶瓷和大理石等高硬度金属和非金属材料。磨削速度是指砂轮线速度，一般为30~35m/s，超过45m/s时称为高速磨削。磨削通常用于半精加工和精加工，精度可达IT8~5甚至更高，表面粗糙度一般磨削为 $R_a1.25\sim0.16\mu\text{m}$ ，精密磨削为 $R_a0.16\sim0.04\mu\text{m}$ ，超精密磨削为 $R_a0.04\sim0.01\mu\text{m}$ ，镜面磨削可达 $R_a0.01\mu\text{m}$ 以下。磨削的比功率（或称比能耗，即切除单位体积工件材料所消耗的能量）比一般切削大，金属切除率比一般切削小，故在磨削之前工件通常都先经过其他切削方法去除大部分加工余量，仅留0.1~1mm或更小的磨削余量。随着缓进给磨削、高速磨削等高效率磨削的发展，已能从毛坯直接把零件磨削成型。也有用磨削作为荒加工的，如磨除铸件的浇冒口、锻件的飞边和钢锭的外皮等。

1.3.1 磨削加工的类型

外圆磨削：主要在外圆磨床上进行，用以磨削轴类工件的外圆柱、外圆锥和轴肩端面。磨削时，工件低速旋转，如果工件同时作纵向往复移动并在纵向移动的每次单行程或双行程后砂轮相对工件作横向进给，称为纵向磨削法，如图1-2所示。如果砂轮宽度大于被磨削表面的长度，则工件在磨削过程中不作纵向移动，

而是砂轮相对工件连续进行横向进给，称为切入磨削法。一般切入磨削法效率高
于纵向磨削法。如果将砂轮修整成成型面，切入磨削法可加工成型的外表面。

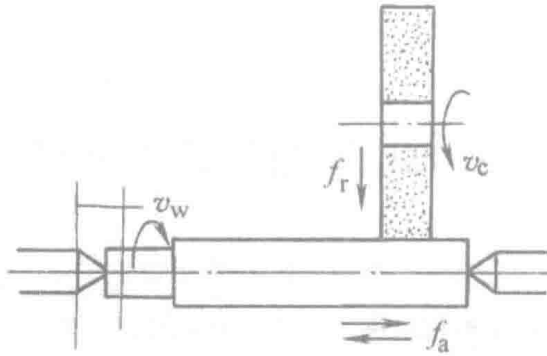


图 1-2 纵向磨削

v_w —工件圆周速度； v_c —砂轮圆周速度； f_r —纵向进给量； f_a —横向进给量

内圆磨削：主要用于在内圆磨床、万能外圆磨床和坐标磨床上磨削工件的圆柱孔（图 1-3）、圆锥孔和孔端面。一般采用纵向磨削法。磨削成型内表面时，可采用切入磨削法。在坐标磨床上磨削内孔时，工件固定在工作台上，砂轮除作高速旋转外，还绕所磨孔的中心线作行星运动。内圆磨削时，由于砂轮直径小，磨削速度常常低于 30m/s。

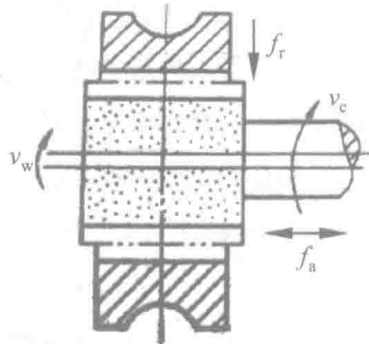


图 1-3 内圆磨削

平面磨削：主要用于在平面磨床上磨削平面、沟槽等。平面磨削有两种：用砂轮外圆表面磨削的称为周边磨削，如图 1-4 所示。一般使用卧轴平面磨床，如用成型砂轮也可加工各种成型面；用砂轮端面磨削的称为端面磨削，一般使用立

轴平面磨床。

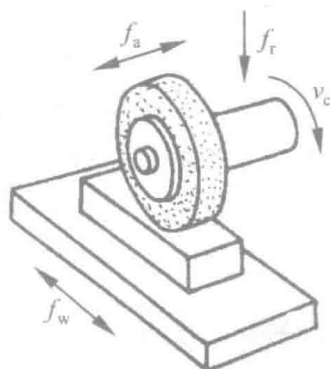


图 1-4 平面磨削（周边磨削）

无心磨削：一般在无心磨床上进行，用以磨削工件外圆。磨削时，工件不用顶尖定心和支承，而是放在砂轮与导轮之间，由其下方的托板支承，并由导轮带动旋转。当导轮轴线与砂轮轴线调整成斜交 $1^\circ\sim 6^\circ$ 时，工件能边旋转边自动沿轴向作纵向进给运动，这称为贯穿磨削，如图 1-5 所示。贯穿磨削只能用于磨削外圆柱面。采用切入式无心磨削时，须把导轮轴线与砂轮轴线调整成互相平行，使工件支承在托板上不作轴向移动，砂轮相对导轮连续作横向进给。切入式无心磨削可加工成型面。无心磨削也可用于内圆磨削，加工时工件外圆支承在滚轮或支承块上定心，并用偏心电磁吸力环带动工件旋转，砂轮伸入孔内进行磨削，此时外圆作为定位基准，可保证内圆与外圆同心。无心内圆磨削常用于在轴承环专用磨床上磨削轴承环内沟道。

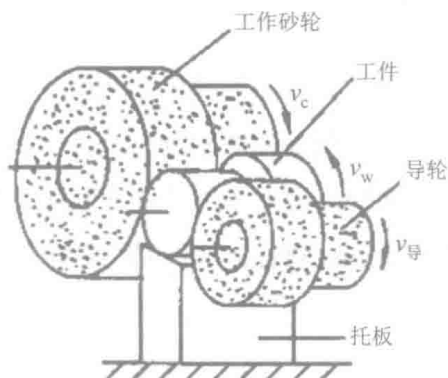


图 1-5 无心磨削（贯穿磨削）