

高速高效磨削传热过程 建模与数值分析方法

金滩 易军 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

高速高效磨削传热过程 建模与数值分析方法

金 滩 易 军 著



机械工业出版社

本书以高速与超高速高效深切磨削模式的传热理论分析为起点,建立了磨削传热分析的系统分析模型。本书具体内容如下:对磨削区内的对流换热冷却作用进行了定量分析和测量,建立了磨屑与工件之间热分配定量分析模型;通过系统联系工件、砂轮磨粒、磨削液以及磨屑之间的传热关系,建立了磨削温度分析的完整模型;建立了齿轮成形磨削的完整传热模型,可以对渐开线齿轮成形磨削传热问题进行详细分析;通过多个具体实例介绍了不同磨削工况下磨削温度的计算方法和计算流程,同时还结合实际研究工作,详细介绍了磨削温度数值仿真分析的方法和具体步骤。

本书可作为高等院校机械制造相关专业研究生和高年级本科生的选修课教材,也可作为从事机械加工的工程技术人员和研究人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高速高效磨削传热过程建模与数值分析方法/金滩,易军著. —北京:机械工业出版社, 2016. 1

ISBN 978 - 7 - 111 - 52729 - 9

I. ①高… II. ①金… ②易… III. ①高速磨削 - 传热过程 - 数值分析 - 分析方法 IV. ①TG580.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 016342 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:张敬柱 马 晋 责任编辑:王晓洁 王 良 宋亚东

版式设计:霍永明 责任校对:张 征

封面设计:路恩中 责任印制:李 洋

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2016 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm · 10.5 印张 · 253 千字

0001—2000 册

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 52729 - 9

定价: 49.80 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

前 言

磨削是保证各类精密零件的加工精度、表面质量和表面完整性的重要手段。如何正确选择磨削条件和磨削参数,有效控制磨削温度,避免磨削烧伤,获得符合使用要求的零件表面硬度、残留应力和显微组织状态,是磨削理论与技术研究以及具体工程应用中的重要课题。

作者对于磨削传热分析的兴趣始于 20 世纪 90 年代初,比较系统的工作则始于 1997 年。在跟随蔡光起先生开展高速与超高速磨削理论和技术研究期间,对高效深切磨削的传热机制开展了比较系统的研究工作。后来在英国利物浦约翰摩尔大学以及克兰菲尔德大学工作期间,作者在布赖恩·罗以及大卫·斯蒂芬森教授指导下,做了深入研究。2010 年回国后,在湖南大学工作期间,对齿轮磨削传热模型开展了进一步的研究。本书正是作者对过去十几年来在磨削传热理论方面研究工作的总结。

本书以高速与超高速高效深切磨削模式的传热理论分析为起点,建立了磨削传热分析的系统分析模型。相关模型和分析方法对于普通磨削模式也完全适用,分析精度和准确性更高。本书厘清了在一般传热分析中容易忽视但却非常重要的内容,对磨削区内的对流换热冷却作用进行了定量分析和测量,建立了磨屑与工件之间热分配定量分析模型。通过系统联系工件、砂轮磨粒、磨削液以及磨屑之间的传热关系,建立了磨削温度分析的完整模型。只要知道磨削区总的热流输入或者总的磨削功率,即可对磨削区工件表面温度以及表层温度分布进行较为准确的预测和计算。本书还建立了齿轮成形磨削的完整传热模型,可以对渐开线齿轮成形磨削传热问题进行详细分析。本书还通过多个具体实例介绍了不同磨削工况下磨削温度的计算方法和计算流程,同时还结合实际研究工作,详细介绍了磨削温度数值仿真分析的方法和具体步骤。

本书在编写过程中参考和引用了许多著作的内容,在此向各位作者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有不足之处,恳请广大读者批评指正。

金 滩
长沙岳麓山下

目 录

前言

第1章 磨削热的生成及对工件表面质量的影响	1
1.1 磨削机制	1
1.2 磨削热的生成	2
1.3 比磨削能	3
1.4 磨削热分配	7
1.5 磨削热损伤	7
第2章 磨削传热基本模型	14
2.1 磨削区温度场理论分析简介	14
2.2 不同热源条件下的温度场	14
2.3 受绝热面限制的非无限大导热体的温度场	19
2.4 Jaeger 移动热源模型	20
2.5 倾斜移动面热源传热模型	21
2.6 圆弧接触移动热源模型	26
2.7 瞬时传热问题	27
2.8 瞬态表现	29
第3章 磨削区热分配子模型	31
3.1 概述	31
3.2 磨削区传热比率	32
3.3 磨削区传热比率随磨削参数的变化	33
3.4 未变形磨屑厚度与磨粒成屑区切应变	36
第4章 磨削液的冷却效应与表面传热系数	40
4.1 概述	40
4.2 磨削液的种类和组成	41
4.3 表面传热系数模型	42
4.4 磨削区表面传热系数的实际测量与评估	50
4.5 根据磨削温度对磨削区流体表面传热系数的估算方法	52
第5章 渐开线齿轮成形磨削温度	57
5.1 齿轮成形磨削几何学和动力学	57
5.2 齿轮成形磨削温度理论模型	63
第6章 磨削传热分析有限元方法基础	72
6.1 有限元方法及分析程序简介	72
6.2 ANSYS 软件操作步骤	72

6.3	不同类型载荷加载	73
6.4	单元生死	74
6.5	循环控制	76
第7章	磨削温度计算实例	78
7.1	平面磨削温度计算实例	78
7.2	齿轮成形磨削温度计算实例	82
7.3	高效深切磨削温度计算实例	87
第8章	有限元仿真实例	90
8.1	普通浅磨实例分析	90
8.2	外圆磨削温度分析实例	110
8.3	齿轮成形磨削温度有限元仿真	123
8.4	高效深切磨削温度计算	138

第 1 章 磨削热的生成及对工件表面质量的影响

1.1 磨削机制

磨削加工是使用高速旋转的砂轮，通过砂轮表面众多磨粒对工件表面的切削、耕犁、滑擦等共同作用，在工件表面去除一层材料，获得要求的尺寸精度、形状精度和表面质量的加工方法。在磨削过程中，砂轮高速旋转，在一定的磨削深度和工作台进给速度下在工件表面去除一层材料；砂轮表面随机分布的众多磨粒在极短的瞬时与工件材料产生干涉作用，对接触区工件材料造成复杂的应力、应变、摩擦和传热效果，直接影响磨削力、比磨削能等宏观输出，并进而影响磨削区生成的总热量、热流分布、热分配、工件表层的磨削温度分布以及砂轮磨损状况，从而影响实际的磨削效果。在不同的磨削参数（砂轮磨削速度、磨削深度、工作台进给速度）、砂轮（包括砂轮磨粒种类、粒度、密度、结合剂类型、砂轮硬度或气孔率、砂轮修整以及磨损情况等）以及磨削液供给（磨削液种类、喷嘴设计、供给压力、流量等）条件下，磨削区的传热条件极其复杂，影响因素众多，因而成熟稳定的磨削工艺的热设计与应用取决于多方面条件。完整可靠的磨削热分析理论与技术方法，是实现可靠磨削工艺设计的重要工具。

从传统加工方法来说，磨削属于一种精密加工的方法，工件在经过铣削、车削等粗加工和半精加工工序后，一般还需经过磨削工序以达到较高的尺寸精度、几何精度和表面质量要求。近年来，随着磨削理论尤其是磨削传热理论的发展和对磨削加工机制理解的不断深入，加之硬件技术包括超硬磨料技术以及高速和超高速、大功率、高刚度磨削装备研制水平的提高，高效深切磨削技术（High Efficiency Deep Grinding, HEDG）得到了极大发展，并在国内外工业界获得了成功应用^[1-18]。在高效深切磨削中，砂轮线速度一般在 $150 \sim 200\text{m/s}$ 之间，磨削深度可达 $5 \sim 30\text{mm}$ 。极高的砂轮速度、大切深结合较高的工作台进给速度（ $10 \sim 50\text{m/min}$ ），使磨削区传热机制较之传统磨削方式发生根本性转变，加工表面温度可显著低于砂轮与工件接触区温度，并且 $80\% \sim$

90% 的磨削热可被磨屑带走^[10,12,18]。

HEDG 的热设计一方面可极大提高磨削效率，同时可有效降低磨削表面温度，有利于控制表面热损伤，获得良好的表面完整性。传统精密磨削（浅磨）示意图如图 1-1 所示。

对于金属材料的磨削加工，一般认为磨粒对接触区材料存在切削（Cutting）、耕犁（Plowing）、滑擦（Sliding）等三种作用机制^[19]。国内外学者从不同角度对这一问题进行了多方面的理论和试验研究。张幼祯^[20]在《金属切削理论》一书中引用 R. S. 哈恩和 R. P. 林赛等人的

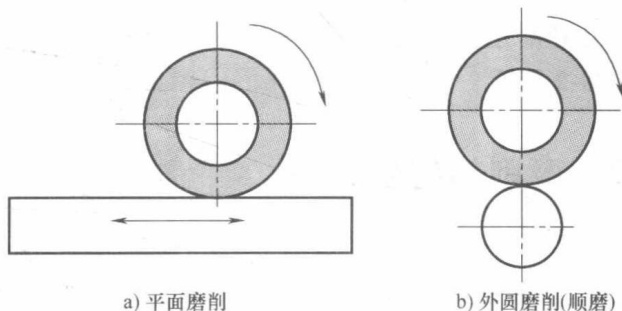


图 1-1 传统精密磨削（浅磨）示意图

研究结果,通过磨削试验得出了单位切削宽度的磨削力 F'_n 与磨削深度 a_p 之间的关系^[20],阐明了临界磨削力与切削、耕犁、滑擦三阶段的联系。其研究表明,切削、耕犁、滑擦三个磨削阶段与磨粒的切削厚度 a_g 有关,在临界切削厚度 a_{gmin} 以下,磨削刃只在工件表面滑擦,而不形成切屑。K. 斯蒂芬斯 (K. Steffens) 和 W. 凯尼格 (W. Koenig) 应用平面滑移线场理论,建立了描述单颗粒切入工件材料过程的滑移线场模型^[21,22]。其分析表明,磨粒在刚接触工件材料时,只引起摩擦和弹性变形,接着是单纯的耕犁作用,在切削刃下近乎圆形的区域内存在着塑性变形;在达到临界磨削厚度后同时发生耕犁和切屑的形成。此外,W. 洛茨 (W. Lortz) 等用分析理论格子变形的的方法,对磨削区材料瞬时自由流动进行了研究,指出在邻近死区的速度不连续滑移线附近,产生薄层的金属剧烈变形,并导致材料局部硬化,在磨粒切削刃的正下方,除极薄一层金属材料外,其余部分无塑性变形^[23]。S. 马尔金 (S. Malkin) 结合他本人和其他学者的研究工作,系统考察和论述了在实际磨削条件下磨粒的不同作用机制对磨削力、比磨削能等磨削输出的影响^[19,24,25,26]。

磨粒在磨具上排列的间距和高低都是随机分布的,磨粒是一个多面体,其每个棱角都可看作是一个切削刃,顶尖角大致为 $90^\circ \sim 120^\circ$,尖端是半径为几微米至几十微米的圆弧。经精细修整的磨具,其磨粒表面会形成一些微小的切削刃,称为微刃。磨粒在磨削时有较大的负前角,其平均值为 -60° 左右。磨粒的切削过程可分三个阶段:①滑擦阶段:磨粒开始挤入工件,滑擦而过,工件表面产生弹性变形而无切屑;②耕犁阶段:磨粒挤入深度加大,工件产生塑性变形,耕犁成沟槽,磨粒两侧和前端堆高隆起;③切削阶段:切入深度继续增大,温度达到或超过工件材料的临界温度,部分工件材料明显地沿剪切面滑移而形成磨屑。根据条件不同,磨粒的切削过程的三个阶段可以全部存在,也可以部分存在。磨屑的形状有带状、挤裂状和熔融的球状等,可据此分析各主要工艺参数、砂轮特性、冷却润滑条件和磨料的性能等对磨削过程的影响,从而寻求提高磨削表面质量和磨削效率的措施。在超高速高效磨床上进行外圆深切磨削如图 1-2 所示。

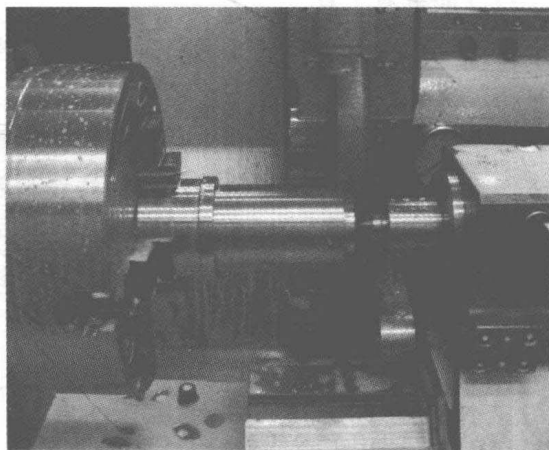


图 1-2 在超高速高效磨床上进行外圆深切磨削

1.2 磨削热的生成

磨削热来源于磨削功率的消耗。砂轮在对工件表面进行磨削加工时,由于磨粒磨刃对被加工表面的切削、刻划、摩擦、抛光作用,使金属在较短的时间内经历挤压、滑移、挤裂、切离四个阶段,从而使磨粒与工件的摩擦及金属的塑性变形能量全部转化为热能,因而使磨削局部区域内的瞬时温度高达 1000°C 左右。磨削功率的消耗除了极少部分消耗于新生面形成所需的表面能、残留于表层和磨屑中的应变能和使磨屑流走的动能外,绝大部分消耗在加热工件、砂轮和磨屑及辐射散逸。

磨削区的能量关系可表示如下

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (1-1)$$

式中 Q ——磨削过程中消耗的总能量 (J);

Q_1 ——金属变形能 (J);

Q_2 ——磨粒与工件摩擦能 (J);

Q_3 ——新生面形成的表面能 (J);

Q_4 ——残留于表层和磨屑中的应变能 (J);

Q_5 ——磨屑动能 (J)。

磨削区的热量传入磨削接触区不同部分

$$Q_t = Q_w + Q_{ch} + Q_s + Q_f \quad (1-2)$$

式中 Q_t ——磨削功转变的总热量 (J);

Q_w ——传入工件的热量 (J);

Q_{ch} ——传入磨屑的热量 (J);

Q_s ——传入砂轮的热量 (J);

Q_f ——传入磨削液的热量 (J)。

1.3 比磨削能

1.3.1 比磨削能的定义

在磨削加工中, 高速旋转的砂轮表面上众多磨粒的切削、耕犁、滑擦所做的机械功绝大部分都转化为热, 并在磨削接触弧区内工件表面、砂轮、磨削液和磨屑之间分配。磨削区的热作用对工件加工精度、表面质量、加工效率和砂轮磨削性能等都有很大的影响。磨削加工中去除工件材料所消耗的能量一般用比磨削能 (e_c) 来衡量。所谓比磨削能是指磨除单位体积的工件所耗用的能量, 一般以 J/mm^3 为单位表示。在平面磨削条件下, 磨削宽度为 b (mm), 磨削深度为 a_e (mm), 工作台速度 v_w (mm/s), 如果磨削功率为 P (W), 则比磨削能 e_c (J/mm^3) 为

$$e_c = \frac{P}{a_e v_w b} \quad (1-3)$$

比磨削能可以用来度量磨削加工过程中材料去除的能量应用效率。一般来说, 在磨削深度较大, 砂轮相对较锋利的情况下, 磨粒的切削作用所占比例相对较大, 去除单位体积工件材料消耗的能量相对较小, 比磨削能相应较低; 反之, 如果在磨削深度很小和砂轮磨钝的情况下, 磨粒耕犁、滑擦作用所占比例提高, 增加了工件表面材料去除的难度, 因而比磨削能相应较高。平面磨削示意图如图 1-3 所示。

1.3.2 尺寸效应与比磨削能

过去几十年对多种金属材料包括钢材、铸铁、钛合金以及高强合金的磨削力和比磨削能的系统测量计

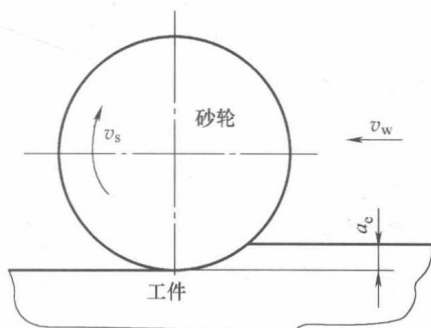


图 1-3 平面磨削示意图

算表明，由于大部分的磨削能量用于砂轮磨粒与工件材料间耕犁、滑擦作用，材料去除效率极低，磨削过程（尤其是传统浅磨和缓进给磨削）中的比磨削能明显高于铣削、车削等切削过程。在相同的砂轮、工件材料和磨削液供给条件下，比磨削能随磨削参数的改变发生变化，在磨削深度或工作台速度降低，即当磨削区未变形切屑厚度或切削横截面积减小时，比磨削能相应增大，即产生所谓的尺寸效应^[19,27]。

尺寸效应产生的原因有几种。根据有关磨削试验及理论计算，磨削成屑过程的剪切应力大大高于材料的屈服应力，在磨屑很薄时，切应力极大。M. C. 肖（M. C. Shaw）据此认为尺寸效应与材料的微观缺陷有关，磨屑厚度减小，则位错等缺陷存在的概率减小，屈服强度增大，在切削近于无缺陷的金属材料时，最大切应力的量值等于 $G/2\pi$ ， G 为材料的剪切弹性模量^[27]。这种假说曾在很长一段时间被国内外学者引用；但后期其他学者通过透射电子显微镜对磨屑的微观观察和有关位错理论的分析研究表明，剪切区内的位错密度极大，这与 M. C. Shaw 的假说显然有很大的矛盾^[19]。有些学者认为，磨削中的高比磨削能，与磨削成屑绝热过程有关。在磨削过程中消耗的能量绝大部分转化为热量，由于极高的切削速度和大应变，磨削成屑速度极快，接近于绝热过程，即材料变形所产生的热量来不及向外传散。在绝热条件下，输入的塑性变形能最高不会超过材料的熔化能，即不会超过单位体积的材料从环境温度加热至熔融状态所需的能量。对于钢铁材料，其单位体积的熔化能为 10.5J/mm^3 。实际上，传统磨削方式（传统浅磨以及缓慢进给磨削）中的比磨削能都高于该值，一般在 $20 \sim 60\text{J/mm}^3$ 之间，在磨屑很薄时，比磨削能可以远超过这一量值。可见，用材料的熔化能来确定比磨削能的上限并不符合实际情况^[19,25]。

1.3.3 滑擦力与滑擦能

磨削中，材料的去除主要是通过成屑作用实现的，这一点可以从对磨屑的观察中看出，如图 1-4 所示。但是大量的比磨削能还消耗在成屑以外的其他机制上。其中一种是磨粒磨钝顶平面与工件表面间的滑擦作用，这种作用基本上不产生去除材料的效果。磨粒上的磨钝顶平面一般是在修整或磨削过程中产生的。

有关的试验表明，在其他磨削参数固定的条件下，法向力及切向力随砂轮磨钝顶面积的增大而增大。对于钢铁材料，磨削力随磨钝顶面积线性增长，达到某一临界点后，斜率增大（陡峭），工件发生烧伤。许多非铁金属材料的磨削力与砂轮磨钝顶面积也呈现出这种线性变化，但没有斜率的突变。基于这类试验发现，S. Malkin 和库克（Cook）等人提出，磨削力由切削和滑擦两部分组成^[19,24]。砂轮磨钝面积率 A 等于零时的磨削力对应切削过程，而后附加的磨削力则对应滑擦作用，即

$$F_t = F_{t,c} + F_{t,sl} \tag{1-4}$$

$$F_n = F_{n,c} + F_{n,sl} \tag{1-5}$$

滑擦力与磨钝顶面积之间的线性关系（在不连续点以前），意味着在其他磨削条件不变的情况下，磨钝顶平面与工件间的压应力和摩擦因数为常数，故上述公式中的磨削力也可写成

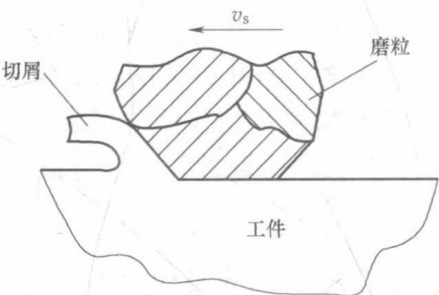


图 1-4 带有磨钝顶平面的磨粒简图

$$F_t = F_{t,c} + \mu \bar{p} A_a \quad (1-6)$$

$$F_n = F_{n,c} + \bar{p} A_a \quad (1-7)$$

式中 A_a ——磨钝顶面积与工件的实际接触面积。

1.3.4 耕犁 (Plowing) 与成屑 (Chip formation)

磨粒切削作用的比能耗, 即比磨削能中扣除滑擦因素剩余的部分, 可用下式计算

$$u_c = \frac{F_{t,c} v_s}{b v_w a_p} \quad (1-8)$$

式中 $F_{t,c}$ ——切向磨削力, 对应完全锋利的砂轮 (砂轮磨钝面积率 $A=0$);

v_s ——砂轮线速度;

b ——磨削宽度;

v_w ——工件进给速度;

a_p ——磨削深度。

对于钢铁材料 (例如高碳钢) 的磨削试验表明, 比磨除率较低 (磨屑厚度较小) 时, 比切削能 u_c 非常高。但比磨除率增加后, 比切削能随之下降, 趋向于最小值 13.8 J/mm^3 并基本保持稳定, 而且不同磨粒粒度砂轮 (F30 ~ F120) 的试验结果落在一条曲线上^[24,25,28]。而在比磨除率固定的条件下 ($v_w a_p = 1 \text{ mm}^2/\text{s}$), 不同钢材 (从低碳钢直至淬硬高速工具钢) 的比切削能几乎完全相同 ($u_c = 40 \text{ J/mm}^3$), 这一结果有些出人意料, 因为材料的硬度区别是相当大的。

从上述试验结果可见, 即使扣除滑擦能耗, 尺寸效应仍然存在, 并且在磨屑厚度很小时, 比切削能极大, 远远超过普通切削的量级, 很难用一般的塑性理论加以解释。

比切削能除用于成屑外, 还应考虑耕犁能, 即仅使材料发生塑性变形而未被去除所消耗的能量。通常耕犁指切削沟痕两侧的材料侧流隆起, 但还可以包括材料通过切削刃下部的塑性变形。在磨刃通过磨削区时, 其切深从零开始增至最大值 h_m 。初始阶段磨粒与工件为弹性接触, 其能耗与整个磨削能相比显示不出来, 一般可以忽略, 而后跟随的是塑性变形 (耕犁)。平均来说, 成屑作用仅发生在切削刃切深超过某一临界值以后。影响该临界切深的因素包括磨粒刃口锐利程度、取向、前角以及摩擦因数。即使在成屑以后, 耕犁作用依然存在。对这类现象, 人们以往做过大量研究, 多数是采用三棱锥或四棱锥形的刀头来模拟切削刃。

在模拟切削刃的正切削试验中发现, 对应某一固定的切深, 存在一个临界前角, 在该临界前角以下, 产生侧向耕犁, 而在该值以上, 产生成屑作用, 而且这种转变发生在较窄的前角范围内。在该范围内, 成屑和耕犁作用同时存在, 切削刃的斜角切削则有增大侧向耕犁的作用。

对于上述临界切深耕犁和临界前角耕犁机制, S. Malkin 认为前者可用于说明磨削中的尺寸效应^[19,29]。增大工件进给速度 v_w 或磨削深度 a_p , 都会增大未变形切屑厚度, 从而在到达临界切深 h' 前, 耕犁至两侧的材料体积相对于后续成屑体积减小如图 1-5 所示。相对来说, 在较大比磨除率 ($v_w a_p$) 下, 比耕犁能 u_{pl} 将减小, 在极限情况下, 比耕犁能趋于零, 最小比切削能即对应于比成屑能 $u_{ch} = 13.8 \text{ J/mm}^3$, 并认为该比成屑能为常数, 而比耕犁能则与比磨除率大致成反比。综合起来说, 总的比磨削能可以认为由成屑 (Chip formation)、耕犁 (Plowing) 和滑擦 (Sliding) 项组成

$$u = u_{ch} + u_{pl} + u_{sl} \tag{1-9}$$

式中 u_{sl} ——比滑擦能。

其中仅比成屑能 u_{ch} 用于实际去除材料，故而是所需的最低能量。对于钢铁材料， $u_{ch} = 13.8 \text{ J/mm}^3$ ，仍远远高于一般切削过程的比能耗，而且与其他金属加工过程的能量输入要求不同，最小比磨削能对合金成分及其后续热处理（是否淬硬）并不敏感。例如，热轧低碳钢的最低比磨削能实际与淬硬合金钢甚至淬硬高速工具钢相同。

为解释磨削中的这种特殊现象，一些学者认为可以将最低比磨削能（Minimum specific energy）与同种材料的熔化能加以比较^[25,26,30]。在典型情况下，75%的成屑能（Chip formation）与剪切过程（Shearing）有关，余下的25%则归于磨屑与切削刃间的摩擦，这相当于用于剪切的比能耗约为 10.4 J/mm^3 ，该值恰好与钢铁材料单位体积的熔化能相当。这一相等关系可归因于磨削成屑过程的大变形和近于绝热的条件。大应变条件下的绝热变形，其塑性变形的能量应该不会超过材料的熔化能。比磨削能与熔化能之间的对应关系并不局限于钢材，对其他多种金属材料磨削试验也表现出这种对应关系。热处理和合金成分对最低比磨削能无影响，主要是因为熔化能对这些因素不敏感。

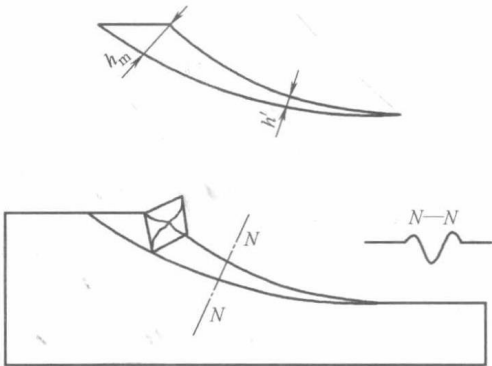


图 1-5 磨粒的临界耕犁深度

1.3.5 比磨削能随磨削参数和磨削条件的变化

在磨削过程中，随着材料磨除率的提高，未变形磨屑厚度增大，磨粒的切削作用增强，耕犁和滑擦能在总磨削能中所占的比率减小，因而比磨削能一般会随材料磨除率的提高而下降。在高效深切磨削模式下，由于磨削深度可达 $1 \sim 10 \text{ mm}$ ，比磨削能比传统浅磨显著降低，最低可达 $6 \sim 7 \text{ J/mm}^3$ 。在工件、砂轮、磨削液以及磨削模式固定的条件下，比磨削能 (e_c) 与材料去除率 [$Q'_w, \text{ mm}^3/(\text{mm} \cdot \text{s})$] 大致呈指数关系变化

$$e_c = A \cdot Q'^{-t}_w \tag{1-10}$$

常数 A 和 t 可通过将理论曲线与实际测量数据拟合确定。图 1-6 所示为高效深磨条件下比磨

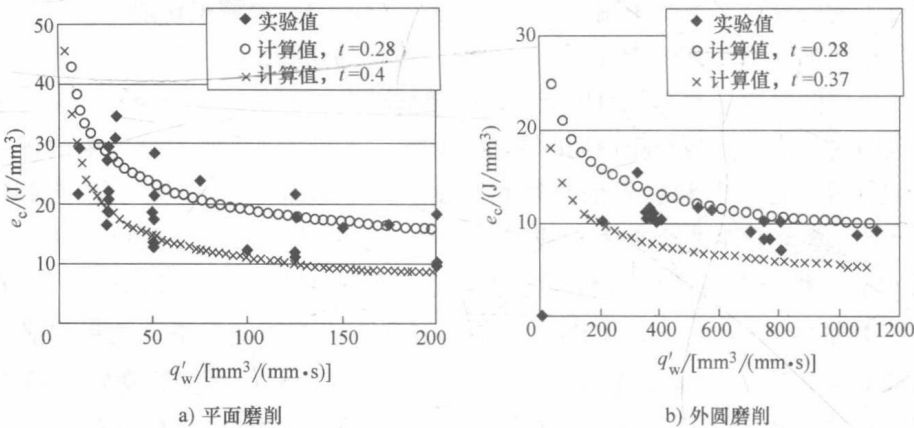


图 1-6 比磨削能随比磨除率的变化

削能随比磨除率的变化。表 1-1 给出了不同磨削条件下 A 、 t 值的典型数据^[12]。

表 1-1 特定磨削条件下公式（1-10）中 A 、 t 的取值范围

工件材料/砂轮磨粒种类	A	t	$v_s/(m/s)$
钢/CBN	70	0.25 ~ 0.4	0 ~ 150
钢/ Al_2O_3	140	0.45	60
IN718/CBN	150	0.28	150
MAR M002/CBN	400	0.7	150
Ti-6-4/ Al_2O_3 (浅磨)	106	0.56	30
Ti-6-4/Diamond (浅磨)	53.1	0.0619	30

1.4 磨削热分配

在磨削过程中，磨削区总热量分别传入工件、砂轮、磨削液和磨屑。磨削热分配到不同传热体的比率随磨削参数和工艺条件会发生很大变化，是磨削传热设计和计算磨削温度时需考虑的重要因素。在典型传统浅磨条件下，传入工件的热比例一般在 50% ~ 60%^[31,32]；而在缓进给磨削中，传入工件的热比率极低，一般低于 5%^[33]，大部分的热量被磨削液带走。近年来的研究表明，在高效深切磨削条件下，磨削区的传热机制发生改变，被磨屑带走的热量可占总磨削热的 80% 以上^[10]。磨削区的热分配与工件材料受砂轮的热特性、磨削液种类与供应条件、砂轮磨损状态以及磨削参数等众多因素的影响，分析起来比较复杂，将在后续章节系统介绍。

1.5 磨削热损伤

由于磨削过程中工件表面层温度和温度梯度的影响，易对工件的表面质量和使用性能造成影响，尤其是当温度在界面上超过某一临界值时，就会引起工件材料产生一系列的物理化学变化。在工件表层及亚表层所形成的磨削变质层称为热损伤层，如表面氧化、烧伤、金相转变、可能产生二次淬火、表层的软化（退火）、残留应力及裂纹疲劳强度的降低等^[34,38]，其结果将会导致零件的抗磨损性能降低、应力锈蚀的灵敏性增加、抗疲劳性变差，从而降低零件的使用寿命和工作可靠性。化学变化的主要形式是，在高温下工件材料与空气、磨削液之间发生化学反应。物理变化包括因磨削力、磨削温度作用而引起的工件表层的塑性变形和冷作硬化等。此外，磨削周期中工件的累积温度，也常常导致工件产生尺寸精度和形状精度误差。另一方面，磨削区的磨削热不仅影响工件，也影响砂轮的使用寿命。因此，控制与降低磨削温度是保证磨削质量的重要环节。其有效途径包括：合理选择磨削用量（ v_s 、 a_p 、 v_w ）、正确选择砂轮及适时修整砂轮，改善磨削冷却条件等。下面将介绍热损伤的各种常见形式^[4,5]。

1.5.1 工件烧伤

热损伤的一个重要形式就是工件烧伤。当砂轮—工件接触区某一区域温度达到某一临界温度值时，就会使工件表面组织发生变化，形成一层氧化膜。这层氧化膜因厚度不同，对光的反射状态也不相同，因而在工件表面上呈现出不同的颜色，即表面色斑，这是判断烧伤的

重要标志之一。磨削烧伤最初是淡黄色,随着加工条件的恶化,依次变为黄色、褐色、紫色和褐蓝色等不同颜色。根据已磨表面色斑的颜色深浅,通常可以将磨削过程分为正常磨削(无烧伤色斑)、非正常磨削(有明显烧伤色斑),以及介于两者之间的过渡磨削(略带淡黄色烧伤色斑)。钢件磨削烧伤一个典型的特征是工件表面出现带蓝回火色,这是表面形成氧化皮的结果,但这层氧化皮可通过磨削循环最后的无火花磨削工序去除,特别是外圆磨削可以完全去除。值得注意的是,磨削表面没有出现回火色并不意味着工件没有烧伤。在工件发生烧伤时,磨粒粘接金属的可能性加大,将直接导致磨削力上升,工件表面恶化,砂轮磨损率增加。这些现象表明磨削机理发生了突然变化,可能引起金属组织的变化。

材料不同,磨削烧伤的特点及烧伤后的组织结构是不一样的。就淬火钢而言,一般有三种主要的烧伤形式,即回火烧伤、二次淬火烧伤和退火烧伤^[39]。当表层温度显著地超过马氏体转变温度(中碳钢约为 260 ~ 270℃)而又低于其相变临界温度 A_{c1} (中碳钢约为 727℃) 时,工件表面原来的马氏体组织将产生回火现象,转化成硬度较低的索氏体和托氏体,表面变软,这种现象称为回火烧伤。如果工件磨削区中某些地方的表面温度超过相变临界温度,就会形成奥氏体组织,在磨削液的急冷作用下,表面的最外层会出现二次淬火马氏体组织,硬度比原来的回火马氏体高,在它的下层因冷却较慢而形成硬度较低的回火组织,这一现象称为二次淬火烧伤。若磨削温度超过工件的相交临界温度,又因工件冷却缓慢而使磨削后表面的硬度急剧下降,则产生了退火烧伤。

正常状态下或在材料性能所允许的临界温度以下生成的氧化膜很稳定、完整、致密,且与基体金属结合得很牢固,不易剥落,即使厚度很小,也能将金属与外界隔离开来,因此这种氧化膜可减弱或阻止氧化的进一步发展,起到防腐抗氧化的作用。磨削烧伤所形成的氧化膜是不稳定且不连续的,与基体结合也很不牢固,这种氧化膜本身很松散,存在空隙和裂纹,很容易脱落,不能整体、致密地覆盖在金属表面,外界介质容易进入基体,导致基体被腐蚀和氧化;同时,在磨削高温作用下,引起工件表面晶格出现畸形和晶界错位,化学成分偏析,造成电位差,引起电化腐蚀。因此,烧伤氧化膜不但不起保护作用,反而使材料的抗腐蚀能力和耐疲劳强度大大下降^[40]。

1.5.2 回火

钢通常是在淬硬后进行磨削的,磨削热产生回火会引起已加工表面附近的某些软化。淬硬马氏体的回火软化是一个复杂过程,其软化程度主要取决于碳的析出、温度的高低及时间历程。回火硬度可用变时间温度下的单值函数表示^[12]

$$H = H_i [\theta(C + \ln t)] \quad (1-11)$$

式中 H ——回火硬度;

H_i ——初始硬度;

θ ——回火温度;

t ——时间;

C ——与工件材料相关的试验常数。

热损伤对工件次表面的影响较大。工件材料的次表面温度历程非常复杂,其达到的最高温度非常重要,对退火有重要影响。表面深度下 Z 的最大温升可表示为

$$\bar{\theta} = \frac{\pi \kappa V}{2 \alpha q} \theta_m = 3.1 L^{0.53} \exp(-0.69 L^{-0.37} Z) \quad (1-12)$$

$$Z = \frac{Vz}{2\alpha} \quad (1-13)$$

$$L = \frac{Vl}{2\alpha} \quad (1-14)$$

式中 $\bar{\theta}$ ——无量纲最高温升；

θ_m ——最大的准稳态温升；

q ——进入工件的磨削热流量；

κ ——工件导热系数；

α ——热扩散系数；

V ——热源移动速度；

Z ——从实际切深 z 算起的无量纲深度；

L ——无量纲参数；

V —— $V = v_w$ ；

l —— $l = l_c/2$ ；

l_c ——接触弧长。

而时间效应由 l_c/v_w 体现，即经过工件表面每点花了多少时间。试验证明，高的温度和长的时间参数 l_c/v_w 引起工件产生较大的软化。此外，冷却对磨削表面最大磨削区无显著影响，但对次表面温度影响较大。

回火层深度可通过提高工件速度减少热影响深度和加热时间而减少，高效粗磨过程中产生的薄回火层可以通过精磨或最后的无火花磨削去除。

1.5.3 残留应力

残留应力是指没有外力作用下，在物体内部为了保持平衡而残留存在的应力。残留应力可以分为三种^[39]：其一为宏观残留应力，它是整个工件内相互平衡的残留应力，产生的原因是力、温度、材料成分和性能不一致性，而使工件内各部分受力、热作用产生塑性变形不均匀而引起的；其二为晶粒范围内平衡的残留应力，又称为晶体残留应力，只存在于多晶体金属中，是由于各晶粒变形程度不同而产生的；第三种残留应力是在原始晶胞内平衡的残留应力，是因工件受到冷作硬化而产生的。残留应力是因为工件表面附近的非均匀塑性变形引起的。磨粒与工件的挤压干涉产生塑性流动应力。具体而言，工件表面残留应力的产生原因主要包括以下三个方面^[41-43]。（1）冷态塑性变形。工件进行磨削加工时，表面层受到磨削力的作用，产生冷态塑性变形。（2）热态塑性变形。在磨削过程中，磨削温度很高，引起工件表面层材料出现热膨胀，而里层材料温度较低，因此表面层的热膨胀受到里层冷金属的阻碍而产生热压缩应力。如果表层材料的温度超过材料的弹性变形范围，则会产生热塑性变形。磨削结束后，由于冷却作用使得表层材料收缩，随着温度下降到弹性变形范围，将受到里层温度相对较高的“热”材料的阻碍而产生残留拉应力，里层材料则产生残留压应力。磨削温度越高，其热态塑性变形越大，则表面层产生的拉应力就越大。（3）金相组织变化。对于同一种金属材料，不同的金相组织的密度是不同的，其质量体积也不相同，一般来说密

度小的金相组织质量体积大，而密度大的金相组织质量体积小。金属的金相组织发生变化后其密度也会改变，则其体积也会变化。工件在磨削时，当表层材料温度超过其相变温度 A_{c1} 时，如果体积增大出现膨胀现象，则会受里层材料的限制，因而表层材料产生残留压应力；如果其体积缩小而出现收缩现象，则表层材料会产生残留拉应力。加工淬火钢时，当表面温度超过 A_{c1} ，如果迅速冷却，则表层材料转变为二次淬火马氏体，体积增大，并产生残留压应力；如果不是急速冷却，马氏体组织会转变为索氏体或托氏体，体积缩小，产生残留拉应力。实际上，磨削加工后表面层的残留应力是冷态塑性变形、热塑性变形和金相组织变化这三者综合作用的结果。

磨削加工会引起已加工表面附近的残留应力，这将严重影响材料的力学性能。一般来说，残留拉应力对零件的力学性能与使用性能是有害的，而残留压应力则是有利的。残留拉应力主要是由于热应力热应变以及热梯度引起的，磨削区内工件表层的热膨胀受到次表面冷金属的制约，从而在工件表层产生压缩性的热应力，如果该热应力值足够大，就可能引起压缩性塑性流动。当磨削热源消失后，冷却过程中塑性变形材料与更多的次表面材料接触，由于材料的连续统一性要求就迫使工件表层产生残留拉应力。为了保证力学平衡，残留压应力将在材料深层生成，但应力值要远远小于残留拉应力。在磨削的加热和冷却过程中，由于金相组织转变引起的残留应力形成过程非常复杂，而且还常常伴随体积的变化。在磨削生产过程中，残留应力一般为拉应力，说明拉应力的出现主要是因为热损伤引起的，对零件的机械强度有不利影响，而残留压应力普遍被认为有利于工件的力学性能。

1.5.4 磨削裂纹

磨削一些难加工材料（如淬硬钢、陶瓷等）时，如果参数选择不当，可能产生裂纹或显微裂纹。当磨削过程中磨削区温度超过某一临界值时，在磨削液的瞬间冷却下，工件表面的残留应力可能会超过材料的强度极限而产生磨削裂纹。若磨削后残留应力小于材料的强度极限，工件表面也许不会出现磨削裂纹。但是零件在以后的使用过程中受到的总应力为外加应力和残留拉应力之和，如果总应力超过材料的强度极限，则零件在工作过程中很可能出现裂纹，甚至出现断裂现象。

磨削裂纹与其他裂纹（如淬火裂纹，原材料裂纹）明显不同，较小的磨削裂纹只在已磨表面及亚表面出现，深度较浅且基本一致，在已磨表面上表现为微细裂纹，基本与磨削方向垂直，呈现出排列规则的条状裂纹。较严重的裂纹显示为龟甲状（不规则的网状），可以达到表面以下一定的深度，有时还会在表面以下较深的位置产生裂纹。

在严重的磨削裂纹产生之前，工件表面往往已形成了磨削裂纹成核，随着零件使用时间的延长，裂纹成核会沿一定的方向逐步扩大。例如，在二次淬火烧伤区与周围回火烧伤区的交界处就有可能存在磨削裂纹成核。在零件的使用过程中，这些裂纹成核很可能会沿着原始的奥氏体晶界传播扩散，出现裂纹，并会造成零件过早的疲劳破坏。此外，裂纹的产生与工件烧伤一样，只有当磨削温度达到一定的临界值时才会出现。

1.5.5 白层

高硬难加工材料磨削加工后，已加工表面有时会产生一些硬度很高的微细金相组织变质层，在铁基材料中，这种变质层通常呈白色（其颜色依材料基体不同而不同），故被称为

“白层”^[44]。白层是一种形成条件极宽、表现形式各异的表面组织,对于不同的金属材料,在不同的磨损形式、摩擦条件和摩擦副中出现。研究表明,白层是由二次淬火马氏体、残留奥氏体和碳化物等组成的,往往比基体材料更硬更脆。在有白层存在的位置,加工表面层通常由表向里依次是白层、暗层和基体材料^[45-48]。

白层具有硬度高、不易侵蚀、晶粒细、塑性变形严重、有时存在微观裂纹等特征。白层对零件使用过程中的磨损行为有两方面的影响:其一是白层的高硬度可以提高零件的抗磨能力,其二是由于其脆性很大,易形成裂纹,同时由于微裂纹的存在,在零件受载的情况下,白层及其周围的微裂纹可能迅速扩展,引起零件表层材料大块剥落;垂直于表面的微裂纹引起材料开裂;还会导致疲劳裂纹的成核,从而使得工件的疲劳强度降低。白层的出现给机械零件留下了安全隐患,产品的使用性能降低、寿命缩短。白层对产品的使用性能是极其有害的,应该在后续的精加工工序中将其去除。

从白层的形成机理及材料的特性来看,与其他材料相比,难加工材料更容易形成白层。虽然各种机械加工方法都有可能形成白层,但不同的加工方法产生白层的可能性、严重性是不同的,而去除白层的后续工序更不一样。研究发现:硬车削产生的白层比磨削加工产生的白层厚得多。从去除加工方法来看,与其他加工方法相比,磨削具有不可比拟的优越性。由于磨削可以进行无火花磨削,此时可以去除极薄的一层材料(特别是高速磨削),因此不可能在无火花磨削工序中形成白层,而只会去除已产生的白层,这是其他加工方法不可比拟的。由于这个原因,可以在粗加工阶段采用硬车削技术,再采用磨削进行精加工。

参 考 文 献

- [1] TAWAKOLI T. Hochleistungsschleifen, technologie, Verfahrensplanung und wirtschaftlicher Einsatz [M]. Duesseldorf: VDI-Verlag, 1990.
- [2] TAWAKOLI T. High efficiency deep grinding [M]. Duesseldorf: VDI-Verlag and Mechanical Engineering Publications Limited, 1993.
- [3] TAWAKOLI T. Technologische voraussetzungen und theoretische grundlagen fuer das hochleistungsschleifen [J]. Industrial Diamond Review, 1990 (2): 15-17.
- [4] TAWAKOLI T. Hochleistungsschleifen (HEDG) von Inconel und anderen Werkstoffen [J]. VDI-Z134, 1992, 134 (1): 48-57.
- [5] KLOCKE F, BRINKSMEIER E, EVANS C, et al. High speed grinding-fundamentals and state-of-the-art in Europe, Japan and the USA [J]. Annals of the CIRP, 1997, 46 (2): 715-724.
- [6] ROWE W B. Thermal analysis of high efficiency deep grinding [J]. International Journal Machine Tools and Manufacture, 2001, 41 (1): 1-19.
- [7] BELL A, JIN T, STEPHENSON D J. Burn threshold prediction for high efficiency deep grinding [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51 (6): 433-438.
- [8] COMLEY P, WALTON I, JIN T, et al. A high material removal rate grinding process for the production of automotive crankshafts [J]. Annals of the CIRP, 2006, 55 (1): 347-380.
- [9] JIN T, STEPHENSON D J. Heat flux distributions and convective heat transfer in deep grinding [J]. International Journal of Machine Tools and manufacture, 2006, 46: 1862-1868.
- [10] JIN T, STEPHENSON D J. Analysis of grinding chip temperature and energy partitioning in high efficiency deep grinding [J]. Proceeding on Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture, 2006, 220 (5): 615-625.