

理论切削学

〔日〕小野浩二 河村末久 北野昌则 岛宗勉 著

高希正 刘德忠 译

国防工业出版社

理论切削学

〔日〕 小野浩二 河村末久 著
北野昌则 岛宗 勉
高希正 刘德忠 译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书根据日本防卫大学教授、工学博士小野浩二、河村 末久、北野昌则和讲师岛宗 勉著的《理论切削工学》译出。该书是偏重于切削和磨削原理方面的专著。作者应用弹性力学、塑性力学、传热学、摩擦磨损学等基础理论说明切削和磨削机理,并且介绍了一些实验方法和实用数据。对磨削机理、烧伤和表面质量写得尤为深入。全书内容较新,且有一定深度,包括了历年来及近期的研究成果。

本书适用于科技人员和高等院校机械专业的教师、本科学生、研究生参考。

理論切削工学

小野浩二 河村末久 北野昌則 島宗 勉
現代工学社 1979

*

理 论 切 削 学

高希正 刘德忠 译
责任编辑 张仁杰

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张 8¹/₄ 215千字

1985年5月第一版 1985年5月第一次印刷 印数: 0,001— 6,850册

统一书号: 15034·2721 定价: 1.25元

译者的话

本书根据日本现代工学社一九七九年出版的《理論切削工学》一书译出。本书的原作者是日本防衛大学教授工学博士小野浩二、河村末久、北野昌則及讲师島宗 勉等。这是一本关于金属切削、磨削理论方面的专著。全书共分四章。第一章为总论；第二章综合叙述了切削及磨削加工中的基础理论知识，介绍了金属材料的弹性力学、塑性力学、热特性以及摩擦现象等内容，是全书的基础知识；第三、四章则是在第二章的基础上详尽地系统地叙述了金属切削及磨削的基本理论问题，是本书的主要部分。

本书在切削及磨削的理论方面有一定的深度。书中较全面地搜集了历年来及近期的研究成果，并引用了大量的实验数据、资料、图表和计算公式。在各章之后均附有练习题。

本书适用于高等学校机械制造专业的本科学生、研究生及教师作教学参考书，对有关的科技人员也有一定参考价值。

本书的序言及第一、二、三章内容由高希正同志翻译，第四章由刘德忠同志翻译，译稿完成之后由该二同志共同作了校审。由于译者水平有限，时间短促，译文定会存在许多不足之处，请读者批评指正。

翻译本书之际，得到了原著作者多方热情支持与直接帮助，在此顺表诚挚的谢意。

译者

一九八三年四月

原 书 序

从原材料加工成机械零件，要依次进行各种机械加工，其中，切除多余的金属获得所需要的形状的加工方法是精加工的最重要的方法。这是一种随着机床及刀具的进步直至今日还在不断发展着的加工技术。

由于切削技术本来是通过现场的经验积累而不断改进、完善和取得进步的，所以和机械加工学中的其它学科一样，切削加工学的基本理论还不能说已经建立起来，在某种意义上来说，现场技术常常是基本理论的先行。但是，为了与近年来的科学技术的不断革新及取得的长足的进步相适应，在切削加工这一理论中，对切削现象的理论分析、实验的验证等很多的研究工作也逐渐成为必要，希望能在此基础上开辟和发展新的加工技术。今天，在这些研究成果中正出现许多值得重视的结论。就是说，关于切削及磨削的机理、切削力、温度以及加工的经济性问题等很多的理论及实验研究工作的进行，给实际加工的合理化带来了大量好处。现在可以说，切削加工学正在逐渐建立起来。

本书就构成上述切削加工技术的基础切削理论，将直至目前所明了的各种有关理论加以汇总和予以阐述。在切削技术的研究中，有许多基础学科，特别是关于材料的弹性、塑性、热特性以及摩擦现象等基础知识都是必要的。从这一点出发，在本书的第二章，对上述各学科的内容进行了综合叙述，以作为基础的参考资料。在第三、四章，对切削及磨削的一般理论分析尽量作了系统的详细的叙述，同时也对各种比较新的问题作了不太成熟的说明。考虑到读者的方便，在各章中根据需要也涉及了一些实际加工方面的问题。

当然，切削及磨削现象是极为复杂的，至今不能进行解释之

点还很多，所发表的不相同的观点及互相对立的理论也不少。所以本书难免存在有为作者所遗漏及独断的缺点，请读者不客气地予以批评指正，以便将来再版时修正。

本书的编写是以与机械工程有关的专业的大学生或研究生学习时作参考及在进行上述各方面的研究工作时有所帮助为目的，同时也考虑到在当前实际生产中从事工作的技术人员的需要。

最后，对在本书执笔之际所引用的众多的书籍及研究论文的作者致以衷心谢意。本书出版之际，我们也不会忘记现代工学社的林胜平先生的热心与努力，顺致谢意。

著 者

一九七九年一月

目 录

第一章 总论	1
1.1 切削加工概论	1
1.1.1 切削加工的概念	1
1.1.2 切削加工的分类	1
1.2 工件表面形成的方式	3
1.3 关于切削加工理论	6
第二章 材料的机械性质和热性质	9
2.1 材料的变形和破坏	9
2.1.1 金属材料的晶体结构和变形	9
2.1.2 弹性理论	11
2.1.3 塑性理论	13
2.1.4 材料的破坏现象	18
2.2 固体的接触、摩擦和磨损	20
2.2.1 固体接触机理	20
2.2.2 金属的摩擦机理	24
2.2.3 金属的磨损现象	27
2.3 固体的导热	31
2.3.1 导热和放热	31
2.3.2 热量的蓄积和温度的上升	32
2.3.3 固体的摩擦表面温度	33
第三章 切削加工理论	40
3.1 切削机理	40
3.1.1 切屑的形态	40
3.1.2 切屑的生成机理	43
3.1.3 积屑瘤	44
3.1.4 切屑的弯曲	46
3.2 二元切削	48
3.2.1 带状切屑的变形和力学关系	49
3.2.2 剪切角理论	53
3.2.3 剪切区的屈服剪应力	67

3.2.4	前刀面上的摩擦现象	70
3.2.5	剪切型切削	73
3.2.6	切削力与切削条件	75
3.3	三元切削	80
3.3.1	三元切削的几何学	80
3.3.2	切削力	83
3.4	切削温度	85
3.4.1	切削温度的定义	85
3.4.2	切削温度的分析	86
3.4.3	切削温度的测定	94
3.5	刀具的磨损及耐用度	100
3.5.1	刀具材料	100
3.5.2	刀具的磨损形态	107
3.5.3	刀具的磨损机理	109
3.5.4	刀具磨损的理论分析	111
3.5.5	刀具耐用度的判定标准与耐用度方程式	117
3.5.6	影响刀具耐用度的因素	119
3.5.7	材料的可加工性	122
3.5.8	经济切削速度	124
3.6	切削液	125
3.6.1	切削液的功能	125
3.6.2	添加剂及其功能	126
3.6.3	切削液的种类和用途	130
3.7	切削加工表面	131
3.7.1	进给方向上的加工表面不平度	131
3.7.2	切削方向上的加工表面不平度	133
3.7.3	加工变质层	134
3.7.4	加工变质层的测定方法	139
3.8	切削加工中的振动	140
3.8.1	概要	140
3.8.2	自激振动	141
3.8.3	自激颤震机理	143
3.8.4	颤震的近期研究	146
3.8.5	防止颤震的方法	148
3.9	各种切削加工	149
3.9.1	车削加工	149
3.9.2	刨削加工	154
3.9.3	铣削加工	154

VIII

3.9.4 孔加工	157
3.9.5 其它切削加工	159
3.9.6 特殊切削加工	161
第四章 磨削加工理论	169
4.1 磨粒及砂轮	170
4.1.1 磨粒的种类和性质	170
4.1.2 砂轮的构造和表示方法	173
4.2 磨削机理	178
4.2.1 磨削的几何学	178
4.2.2 磨粒切削刃的形状和分布	183
4.3 磨削力	185
4.3.1 磨削力的实验公式	186
4.3.2 磨削力理论	188
4.3.3 单位磨削力和单位磨削能	190
4.3.4 磨削力随时间的变化	193
4.4 磨削温度	195
4.4.1 磨削温度的意义和分类	195
4.4.2 工件的平均温升	196
4.4.3 接触面的温度	198
4.4.4 磨削热引起的加工表面损伤	201
4.5 磨削加工表面的不平度	203
4.5.1 加工面不平度的实验公式	203
4.5.2 磨削加工面的形成机理	205
4.5.3 加工面不平度的理论公式	206
4.5.4 修整条件和加工面不平度	210
4.6 砂轮的损耗和耐用度	211
4.6.1 磨粒的破碎和脱落	211
4.6.2 磨粒的磨耗	215
4.6.3 磨削性能的降低和磨削力的变化	218
4.6.4 砂轮耐用度的判定法	221
4.6.5 砂轮耐用度的分析	222
4.7 考虑了砂轮弹性的最新理论	227
4.7.1 磨粒的滑擦和切削作用	227
4.7.2 砂轮的弹性	229
4.7.3 接触区的长度和局部弹性位移	231
4.7.4 磨削加工的精度	235
4.8 各种磨料加工	240
4.8.1 磨削加工	240
4.8.2 特殊磨削加工法	244
4.8.3 定压磨削加工	249
4.8.4 游离磨粒加工	252

第一章 总 论

1.1 切削加工概论

1.1.1 切削加工的概念

所谓切削加工是用切削刀具将工件表面不必要的部分作为切屑切除掉的加工方法，适用于将工件精加工成所需要的形状及尺寸。为了进行切削，必须使刀具切入工件至某一深度，并沿工件表面作相对运动。完成上述动作的机动装置称为机床。

一般而言，将原材料加工成成品的过程称为机械加工或机械加工过程，其中除切削加工外还包括铸造、锻造等以及其它各种塑性加工方法。由于切削加工方法可以获得比较高的精度，应用范围也比较广，所以在众多的机械加工方法中，切削加工占有重要的地位。

切削加工，虽然在多数情况下适用于对由铸造、锻造等工序粗加工成的毛坯的加工，但有时也用于由原材料直接加工成任意形状的成品的场合。切削加工一般适合于种类多、数量少的单件小批生产，但根据需要也可进行大量生产，为此可以制备适当的专用机床、钻模、卡具等，而使生产得以自动化高效率地进行。

1.1.2 切削加工的分类

根据所使用的工具的种类，切削加工大致可分为：i) 用刀具加工，ii) 用磨料加工。一般从狭义来说，前者称为切削加工，后者称为磨料加工。

(1) 用刀具加工（狭义的切削加工）

在多数场合下，刀具是由工具钢或硬质合金等制造，把其切削部分做成所需要的形状和角度来使用。

如果按刀具的切削刃数分类，则可分成单刃刀具及多刃刀具。

所谓单刃刀具（如同车刀那样），在前端只备有一个主刃，一般情况下，在加工过程中刀具或者固定不动或者作直线运动。多刃刀具（如同钻头及铣刀等那样），具有两个以上的切削刃，多数在回转状态下使用。单刃刀具适用于切深及进给量较大的重切削的场合，而多刃刀具常用在轻切削的场合。表 1-1 列出了依据刀具种类来区分的各种加工方法、所使用的刀具、机床以及主要的加工表面形状。

表1-1 切削加工分类

刀具种类	加工方法	刀 具	机 床	主要加工表面
单刃刀具	车削	车刀	车 床	圆柱外表面，圆锥面
	镗削	镗刀	镗 床	圆柱内表面
	龙门刨削	刨刀	龙门刨床	平面
	牛头刨削	刨刀	牛头刨床	平面
	插削	插刀	插床	平面，圆柱面
多刃刀具	铣削	铣刀	铣 床	平面，沟槽
	钻削	钻头	钻 床	圆孔
	铰削	铰刀	钻床，车床	圆孔
	拉削	拉刀	拉 床	异形孔
	滚削	滚刀	滚齿机床	齿轮齿面
	刨削	刨刀	刨床或手动	平面
	刻模切削	刻模铣刀	刻模铣床	金属模的曲面等

（2）用磨料加工

磨削工具是用矿物质磨粒制成的。磨粒虽非常硬但却很脆，因此产生有不规则的劈裂或破碎，而形成锐利的切削刃。磨粒的使用状态有两种：以原来分散状态的磨粒即游离磨粒使用；将多数的磨粒用粘结剂粘结在一起，并用烧结的方法做成磨具使用。不论是哪种情况，每个磨粒的切深都是极小的，所以切削痕迹细小，加工表面光洁。这种加工方法适合于表面的精加工。

磨料加工按其磨粒切入方式分类，可分为强制切入方式和加

压切入方式两种。强制切入是使作为工具的砂轮对工件作强制的定量切入，认为是能确实切去某确定余量的方法，这种方法一般称为磨削加工。加工时可使用外圆磨床、平面磨床等。采用这种加工方法可以对前道工序加工表面进行修正而不受其约束，加工表面质量好，所以在尺寸精度要求高的情况下，采用这种方法为宜，在这一点上其它方法望尘莫及。加压切入加工是以一定的压力将其磨具或游离磨粒群压向工件，由于这种压力而使工件表面切除掉一定尺寸。珩磨、超精加工及研磨等均属这种加工。这种加工大体是仿效前道工序的表面进行的，随着加工的进行，切深自动减小而产生研磨作用。这种加工方法可以获得极其光亮的表面。

根据切入方式及使用的工具种类，各种磨料加工可按表 1-2 分类。

表1-2 磨料加工分类

切入方式	工 具	加 工 方 法
强制切入	圆形砂轮	外圆磨削 内圆磨削 平面磨削 特殊磨削（螺纹、齿轮等的磨削）
加压切入	圆形砂轮	用砂轮研磨 自由磨削
	方形磨具	珩磨 超精加工
	游离磨粒（研磨工具）	研磨
	同上（超声波珩磨）	超声波加工
	同上（抛光轮）	抛光加工
	同上	液体研磨

1.2 工件表面形成的方式

在切削加工中，新生成的金属表面是由刀具作遍及工件表面

的均匀扫描获得的，而决不能一下子获得很宽的加工表面。

如果把刀具尖端作为一个点元素来考虑，则通过该点元素的运动便组成线元素，该线元素沿与其本身的垂直方向移动，便形成各种加工表面。作为线元素可以是直线（线段）、圆（或者圆的一部分）及其它曲线，这些线元素可由点元素分别做直线运动、回转运动及曲线运动获得。这些线元素做各种运动时所形成的表面类型以及应用这些原理的具体的切削方法示于表 1-3。

作为切削机床的运动形式当然是希望尽量简单。最简单的运动形式是直线运动和回转运动，这样的运动在机床上容易实现而且也易获得高的精度。在机械零件中，其形状大多数是平面、圆柱面或二者的组合。因此在切削加工中最重要而且应用最多的表面形成方式为表 1-3 中的 a 、 b 、 c 所示的方式，这些表面均是由直线或圆作直线或回转运动所形成的。

表1-3 由线元素运动形成的表面

分类	线 元 素	运 动	形成的表面	加工方法
a	直 线	直线	平面 (a)	刨削、平铣
b	直 线	回转	圆柱面 (b_1) 圆锥面 (b_2)	插、铰 插
c	圆或圆弧	直线	圆柱面 (c_1) 圆锥面 (c_2) 平面 (c_3 、 c_4)	车削、镗削 车削 (锥面车削) 端铣、端面车削
d	圆或圆弧	回转	球面 (d_1) 环形面 (d_2)	
e	曲 线	直线	二元曲面 (e)	成形加工、拉削
f	曲 线	回转	回转体曲面 (f)	成形加工、螺纹加工
g	直 线	曲线	二元曲面 (g)	仿形加工
h	圆	曲线	回转体曲面 (h)	仿形加工

图 1-1 所示为表 1-3 中各种线元素运动所形成的表面的图形。图中箭头表示的是线元素运动方向，但在其中的 c 情况下，经常是将为了获得圆线元素的回转运动和为了移动该圆线元素以形成表面的直线运动同时给出。这时，线元素便成了连续不断的螺旋线或阿基米德螺旋线，由它们分别组成圆柱(锥)面或平面。

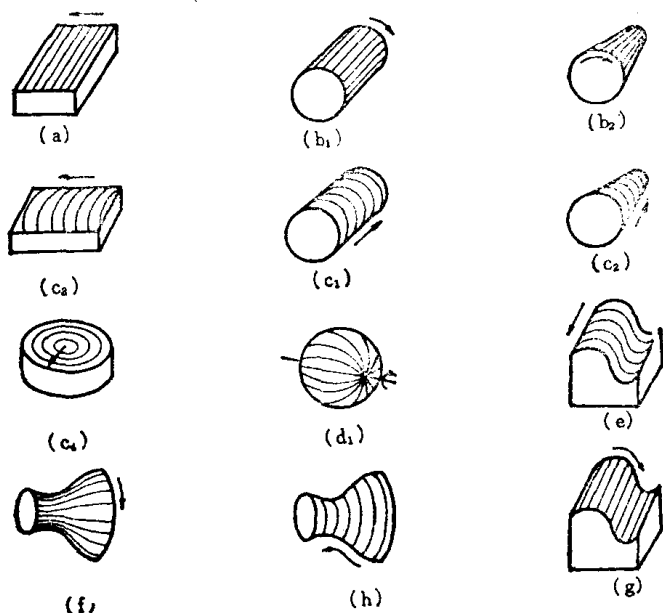


图1-1 由各种线元素形成的表面

作为刀具来说，从一开始就构成线元素的刀具称为成形刀具。这种刀具用来加工以点为基础仅做直线运动和回转运动不能组合出的特殊曲面的场合。

由移动点元素形成的线元素不可能在所要加工成的表面的每一处做完全无间隙的扫描（例如刨削中的进给），而是以某一进给间隔做间歇的移动。因此，在被加工表面上便形成了和刀尖形状及进给量有关的凸凹，这种情况不能形成理想的表面。为了近似得到理想表面，必须尽量减小进给量，但是如果减小到太小就会使加工时间加长，成本增高，因此，应在能满足所要求的表面光洁度范围内选取适当的进给量。

对于切削加工来说,把完成上述的点元素形成线元素的运动一般称为切削运动;把移动线元素形成表面的运动称为进给运动。但在成形切削时并没有上述的进给运动,而进给运动是以切入的形式给出的,该运动的方向垂直于加工表面。

从表 1-3 或图 1-1 可以看出,即使加工相同种类的表面,也可以有各种各样的加工方式,这点应予以注意。充分地理解这些表面形成的各种方式,不仅对于选择零件的加工方法、对新机床的设计和现有设备的使用有益,而且也是机床精度检验方法的依据。

1.3 关于切削加工理论

切削加工的最终目标是获得尽可能高的工件精度、花费尽可能少的费用,而且获得高的生产效率。为合理地实现这一目标而发展起来的理论即为切削理论或切削学。下面列举并简要说明切削理论中的主要问题以及与此相关的各门基础学科。

(1) 切削的力学问题

无论对于刀具还是磨粒,它们一般是切入工件,强行将工件的该部分以切屑的形式使其变形并切除掉。这时的工件受到怎样的应力的作用并以怎样的机理发生变形而成为切屑的呢?此外,刀具也在高的压力下与切屑产生接触摩擦而产生磨损及损坏。将这样的刀具和工件之间的机械互相干涉作用,以包含有摩擦及磨损等在内的材料变形、破坏等现象进行概括,便成为弹性力学及塑性力学的问题。

(2) 切削的热力学问题

伴随着切削中的变形现象会有切削热发生,这给切削加工带来更为复杂的影响,而且切削温度对加工精度和加工变质层的影响作为实际问题也是重要的。由于这些原因,正确评价切削中产生的热、加工表面及表面层内部的温度是必要的。因此,了解和掌握关于热力学及导热理论以及由于热引起的形状及材料性质的变化方面的基础知识便成为必要。

（3）材料学方面的问题

材料的可加工性是个对加工费用及加工精度有重大影响的问题。因此，多年以来，虽然涉及可加工性的广泛的研究一直在进行，但仍然残留着许多还未解决的问题。再有，随着技术的进步，新的高级材料不断被采用，由于这些材料总的来说可加工性是不好的，所以改善它们的可加工性便成了重大课题。此外还必须大大加快对可以切削难加工材料的刀具材料的研究和创新工作。

关于这方面的问题要涉及到前述的（1）及（2）所述的知识，除一般金属材料学外，还迫切期待进行其基础是建立在近代物性理论之上的材料学方面的考察工作。

（4）化学或物理化学问题

切削液的润滑作用可以说与在高温高压下新生成金属表面之间的化学反应有关。如果把切削液的润滑、减摩性等作为问题来研究，则必须把物理化学、化学反应理论作为基础。

（5）机械力学问题

为了进行高精度稳定切削，必须很好地研究包括机床在内的工艺系统的机构、刚性及振动特性等方面的问题，并且必须明确和加工条件的关系。这些均关系到机械力学及振动学等方面的问题。

（6）经济问题

为了能以最高的效率及在最经济的条件下进行某种切削加工，必须设定最合适的加工环境和条件。为此，谋求改善和提高切削技术是自然的，通过社会的努力谋求自动化和最优化也是必要的。

如上所述，切削理论研究的问题很多，从内容来说也是非常复杂和难以掌握的。而且它们之间并不是相互独立，而是有着密切联系的。此外，有关基础科学的种类也非常广泛，可以说所谓切削理论或切削学是一门涉及面非常广的综合科学。

近代的切削理论，是在1945年由美国麦钱特（Merchant）从事对金属切削力学的分析开始的。从那时起，时至今日，关于

切削机理、切削力及其它的切削问题，国内外学者们一直在进行研究和阐明。另一方面，从 1950 年，关于磨削的研究工作也盛行起来，其进步是显著的。但是在切削现象的本质方面还有许多不明之处，现在的切削、磨削理论的研究工作决不能说已经完成，还有待今后取得大的进展。

练 习 题

- 1.1 试对比切削加工（狭义）和磨料加工，叙述其各自的特征。
- 1.2 对给定的工件，在确定加工方法和加工方式时必须注意哪些问题？