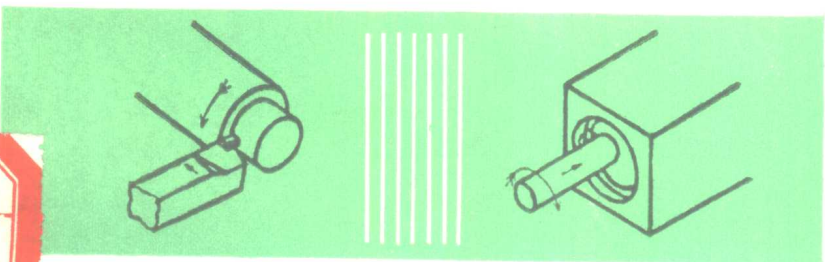
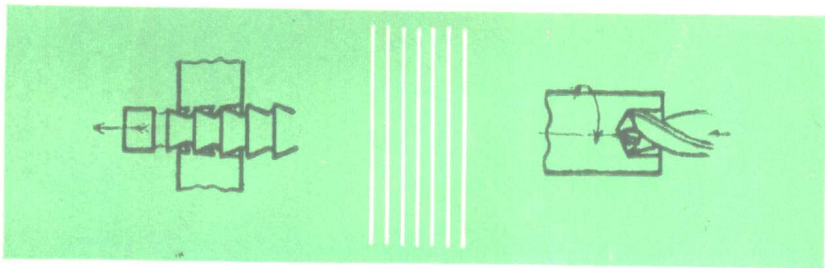
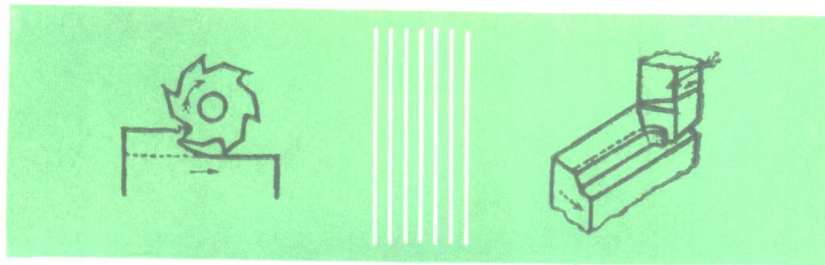


金属切削加工理论

〔日〕 中山一雄



机械工业出版社

金属切削加工理论

〔日〕中山一雄 著

李云芳 译

梁国显 校

5

机械工业出版社

切削加工論

横浜国立大学教授・工学博士

中山一雄 著

コロナ社

* * *

金属切削加工理论

〔日〕 中山一雄 著

李云芳 译

梁国显 校

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第 117 号)

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行・新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ・印张 $7^{3/8}$ ・字数 185 千字

1985 年 3 月北京第一版・1985 年 3 月北京第一次印刷

印数 00,001—15,000・定价 1.45 元

*

统一书号, 15033・5706

译者的话

本书是由中山一雄著的日文《切削加工论》译成中文的。

本书作为一本专业课的教材，内容比较新颖丰富。它包括了金属切削原理的主要理论问题，反映了近代金属切削原理方面发展的水平。它不仅有概念的叙述，还阐明了各种现象产生的原因及其在实际中的应用。在讨论问题时，利用数学方法，结合实际问题的，进行理论分析和计算，避免了抽象、定性的缺点。它既有理论阐述，又有试验方法的介绍。在每章的最后都有总结，它简明扼要、条理分明地回答了切削加工中经常遇到的一些问题，如尽可能降低切削力，提高劳动生产率、已加工表面质量、尺寸精度、刀具耐用度及切屑的可处理性等。这样，使学生学完这门课后，概念清楚、印象深刻，对解决、掌握切削加工中的问题将起到它应有的作用。

本书对于高等工业院校、中等专业学校有关专业的师生，以及从事机械制造业的工程技术人员，都是一本比较好的参考书。

译者在翻译过程中，力求保持原文风格，同时照顾到中文的习惯，以及使工程术语、单位和代号的统一。但由于译者的水平有限，肯定会有不少缺点和错误，衷心地希望读者批评指正。

在翻译过程中，得到梁国显、郑克端两同志的帮助，在此表示衷心的感谢。

一九八二年十一月

序

本书的目的是想尽可能简明扼要地来回答“怎样才能合理地进行切削加工”的问题。所谓合理地进行，包含的内容有：降低切削力和动力；提高加工表面光洁度和尺寸精度；尽量使刀具经久耐用；使切屑容易处理等等。但是，这些内容是相互关联的，所以，正确地理解这些内容，对提高切削加工技术是非常必要的。

本书的对象是从事切削加工的工程技术人员和在大学、大学研究院有关切削实验、研究的师生。因而，本书主要针对具有一定的《机械加工法》（即制造机器的工具和方法）知识的人们写的。

切削加工的历史是非常悠久的，过去在很大程度上是靠熟练工人的经验。但是，最近新的刀具材料不断出现，机床又向高效率化和自动化方向发展，另一方面，熟练工人的数量又不断地急剧减少，相对地说，经验就不占主要位置了。

为了适应这种事态，像其他工程学领域那样，必须更合理地理解切削，根据这种理解，可以更好地发现适宜于新规定条件下的切削条件。

关于切削理论的研究，在这四十年间，由于很多研究者的努力，有了很大的进展。对切削来说，因为它和各种现象的关系很复杂，所以不能像弹性力学、流体力学那样建立起系统的理论体系。可是，在某一限定的条件下建立起来的理论关系，很多是明确了，如果把理论关系和经验公式、实验结果结合起来，就能够更好地理解在实际切削中发生的各种问题的因果关系，由此可以找出具体解决的方针，本书就是这样试着做的。

从名古屋大学春日保男教授那里接受了编写本书的推荐，作

者想在横浜国立大学研究院写的《切削论》讲义的基础上，稍加充实就行了，所以愉快地接受了，但因平素努力不够，结果花费了五年多时间。一定有很多不足之处，只好留待今后有机会时逐步改进，就此告一段落。对本书不足之处敬请读者们指正。

最后，向本书引用的优秀研究论文的作者深表谢意；同时，对在横浜国立大学与作者合作从事研究、对本书提供实验数据和制作照片的诸位致以深切的谢意。

当本书出版之际，得到了コロナ出版社须田功先生的大力协助，在此深表谢忱。

1978年盛夏

作者

切削刀具的刃部形状和切削部分尺寸的术语和符号

本书中所用的术语和符号采用 JIS B 0170-1973 的切削术语 (基本)。其主要的术语和符号如图 0·1、图 0·2 和表 0·1 所示。

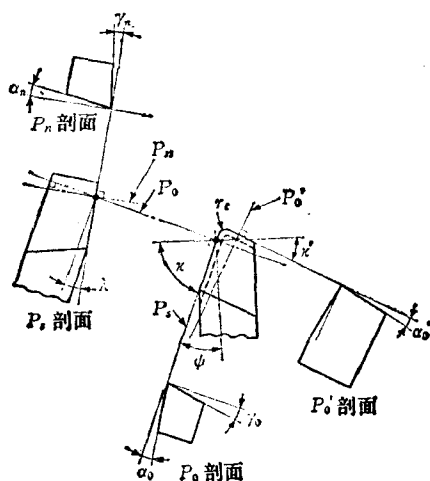


图0·1 表示刃部形状的各种参数 (刀具基准方式, 把主切削刃作为基准时)

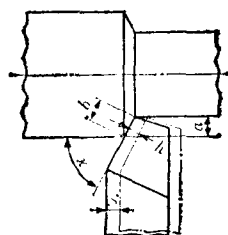


图0·2 与切削部分
有关的各种参数

JIS是仿照ISO制定的欧洲标准，与以前的JIS*和过去日本惯用的标准多少有些不同。特别不同的是前角符号用 γ 、后角符号用 α ，与过去的正好相反，是很容易混淆的。然而，今后应该与世界上的标准统一起来。

再者,为了简单地表示刃部形状,采用列举七个数值的方法。列表0·1的是七个数值的顺序,新旧术语与符号一并列入。

* JIS B 0107-1966是车刀术语, JIS B 4012-1961是车刀的切削试验方法, JIS B 4011-1959是硬质合金车刀的试验方法。

表0·1 表示车刀刃部形状的记载顺序

顺 序	JIS 车刀切削部分 (基本) 所用的 术语和符号 (本书使用)	JIS 车刀切削部分所用的术语和符 号 (参考)
1	刃倾角, λ	刃倾角, α_p
2	前角, γ_0 或法向前角, γ_n	前角, α_n
3	副后角, α'_0	副后角, γ_s
4	主后角, α_0 或法向后角, α_n	主后角, γ_s
5	副偏角, κ'	副偏角, η
6	余偏角, ψ	主偏角, κ
7	刀尖圆弧半径, r_c	刀尖圆弧半径, R

(注) 不重磨式刀具使用 γ_n 与 α_n 是方便的, 然而, 通常 λ 很小, 可以假设 $\gamma_n \approx \gamma_0$, $\alpha_n \approx \alpha_0$

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 切削加工	1
§ 1-2 切削加工方法的发展	1
§ 1-3 研究切削加工的过程	3
§ 1-4 在各种加工方法中切削加工的特征	5
§ 1-5 切削的类型	7
1-5-1 直角切削与斜角切削	7
1-5-2 根据切削的主运动分类	8
1-5-3 根据切削部分断面形状的变化分类	9
1-5-4 切削速度的变化	10
§ 1-6 评价切削加工是否良好的基准	10
参考文献	11
第二章 切屑的形态	12
§ 2-1 切屑形态的分类	12
2-1-1 切屑的形态和形状	12
2-1-2 带状切屑	12
2-1-3 挤裂切屑	14
2-1-4 崩碎切屑	14
2-1-5 其它的分类法	15
§ 2-2 切削比、剪切角和剪切应变	16
§ 2-3 影响切屑形态的因素	18
参考文献	19
第三章 积屑瘤及其类似物	20
§ 3-1 积屑瘤	20
3-1-1 积屑瘤及其类似物的种类	20
3-1-2 观察积屑瘤等堆积物的方法	21
§ 3-2 积屑瘤的生成条件	22

3-2-1 刀具的刃口形状	22
3-2-2 粘结强度	24
3-2-3 加工硬化	25
3-2-4 强度分布与应力分布	29
§ 3-3 积屑瘤的利弊	31
§ 3-4 总结——积屑瘤的发生、防止、小型化和稳定化	34
参考文献	35
第四章 切削所消耗的能量	36
§ 4-1 前言	36
§ 4-2 表面能, W_n	36
§ 4-3 剪切区的剪切变形功, W_s	38
§ 4-4 切屑与前刀面的摩擦功, W_c	40
§ 4-5 后刀面的摩擦功, W_f	42
§ 4-6 动能, W_m	43
§ 4-7 弹性应变能, W_e	44
§ 4-8 总结——切削能的分配	44
参考文献	45
第五章 切削中的摩擦与切削液的效果	46
§ 5-1 一般的摩擦	46
§ 5-2 切削中的摩擦	48
§ 5-3 前刀面上的应力分布	49
§ 5-4 切屑与刀具前刀面的接触长度	50
§ 5-5 切削液的机能	53
5-5-1 润滑	53
5-5-2 冷却	55
5-5-3 界面效应	56
5-5-4 切屑的排除	57
参考文献	57
第六章 切削热与切削温度	59
§ 6-1 切削功与切削热	59
§ 6-2 切削热对温升的影响	60
§ 6-3 切削温度的测定	61

6-3-1	刀具-工件热电偶法	62
6-3-2	把热电偶埋入刀具内的方法	65
6-3-3	在工件内埋热电偶导线的方法	66
6-3-4	用示温涂料的方法	67
6-3-5	辐射高温计	68
6-3-6	红外线照相	70
§ 6-4	切削温度的计算	70
6-4-1	基础方程式	70
6-4-2	切削温度分布的数值计算	72
6-4-3	用近似的面热源数值计算温度分布	74
6-4-4	剪切面温度的解析计算	75
6-4-5	前刀面温度的解析计算	81
§ 6-5	切削热流入比的测量	85
6-5-1	用量热计测量	85
6-5-2	测量流入工件的流入比	87
§ 6-6	切削温度的实用公式	89
	参考文献	90
第七章	切削力	92
§ 7-1	切削力的意义和影响	92
§ 7-2	根据剪切条件而得到的切削力公式	93
7-2-1	直角切削时	93
7-2-2	与直角切削接近的斜角切削时	95
§ 7-3	切削中被加工材料的变形应力	96
7-3-1	应变硬化	96
7-3-2	应变速度的影响——应变速度修正温度	99
7-3-3	剪切区的变形条件	99
7-3-4	前刀面附近的变形条件	102
7-3-5	总结	105
§ 7-4	剪切角理论	107
7-4-1	克罗斯托夫(Krystof)学说(最大剪切应力学说)	108
7-4-2	默钱特学说(最小阻力学说)	108
7-4-3	李(Lee)与谢弗(Shaffer)学说	110
7-4-4	肖、库克、芬妮学说	110

§ 7-5 各角间的实验关系	112
§ 7-6 作用于剪切面和前刀面的力的平衡条件式	114
§ 7-7 剪切角的实验公式	115
§ 7-8 切削力的尺寸效应	118
7-8-1 切削刃刀棱的塌刃和崩刃	120
7-8-2 摩擦应力的增加与剪切角的减小	120
7-8-3 已加工表面表层的流动功	122
7-8-4 材料强度的尺寸效应	122
§ 7-9 切屑的流出方向	123
7-9-1 斯坦勃勒 (Stabler) 法则	124
7-9-2 科尔韦尔 (Colwell) 近似法	124
7-9-3 理论的预测	125
§ 7-10 不用直接测量来推断切削力三个分力的方法	125
§ 7-11 总结——切削各因素对切削力的影响	128
7-11-1 被加工材料性质	128
7-11-2 刀具材料	129
7-11-3 刀具的刃部形状	129
7-11-4 切削深度与进给量	133
7-11-5 切削速度	133
7-11-6 积屑瘤	133
参考文献	133
第八章 切削加工表面的质量	136
§ 8-1 几何方面的质量和材料特性方面的质量	136
§ 8-2 已加工表面的粗糙度	136
8-2-1 理论粗糙度	137
8-2-2 由于切削刃轮廓的不正确而使粗糙度增大	138
8-2-3 因相对运动的不正确而引起粗糙度增大	140
8-2-4 因反映精度的降低而引起粗糙度增大	140
8-2-5 凸起和刮削的影响	142
8-2-6 总结——减小已加工表面粗糙度的诊断法	143
§ 8-3 尺寸精度与形状精度	144
8-3-1 不正确的刀具刀尖与工件的相对运动	144
8-3-2 不正确的刀具尺寸和切削刃轮廓	147

8-3-3 切削刃轮廓与已加工表面的复映精度	147
8-3-4 总结——误差发生的方式和原因	147
§ 8-4 毛刺和小缺口	148
§ 8-5 加工变质层	149
8-5-1 加工变质层的性质和利弊	149
8-5-2 加工变质层的形成原因与防止方法	152
参考文献	154

第九章 刀具的损耗与耐用度 155

§ 9-1 刀具损耗的形态与原因	155
9-1-1 月牙洼磨损	155
9-1-2 后刀面磨损	158
9-1-3 边界磨损(沟槽磨损)	160
9-1-4 崩刃与其它的脆性损伤	161
9-1-5 塑性变形	162
§ 9-2 刀具磨损的影响	163
9-2-1 产品尺寸的精度降低	163
9-2-2 已加工表面的粗糙度增大	165
9-2-3 降低已加工表面的光泽	166
9-2-4 切削力的变化	166
9-2-5 切屑可处理性的变化	166
9-2-6 增大加工变质层与毛刺	167
§ 9-3 刀具磨钝标准	167
9-3-1 现场使用的刀具磨钝标准	167
9-3-2 研究室等处使用的刀具磨钝标准	168
§ 9-4 切削各因素对刀具耐用度的影响	170
9-4-1 影响刀具耐用度的因素	170
9-4-2 切削速度与刀具耐用度	171
9-4-3 进给量、切削深度与刀具耐用度	174
9-4-4 切削温度与刀具耐用度	174
§ 9-5 刀具耐用度的变动	179
§ 9-6 总结——刀具耐用度的延长与预测	180
9-6-1 延长刀具耐用度的方法	180
9-6-2 刀具耐用度的预测与切削加工数据库	182

参考文献	183
第十章 切屑的形状与可处理性	185
§ 10-1 正常切屑的形状	185
10-1-1 切屑形状的一般性质	185
10-1-2 影响螺旋形切屑形状的因素	186
10-1-3 切屑的向上卷曲	188
10-1-4 切屑的横向卷曲	192
10-1-5 切屑的流出角	195
§ 10-2 切屑的折断	195
10-2-1 切屑的折断方法	195
10-2-2 切屑的折断条件	198
10-2-3 因被加工材料不同而产生切屑易折性的差别	201
§ 10-3 切屑的可处理性	202
10-3-1 评价切屑可处理性的方法	202
10-3-2 切屑形状的分类	203
10-3-3 良好的切屑形状	208
参考文献	208
附录	210
A. 关于移动热源问题的杰格 (Jaeger) 解	210
A-1 由瞬时点和瞬时线热源而引起的温升	210
A-2 由移动面热源而引起的温升	211
A-3 由静止面热源而引起的温升	214
A-4 接触面温度——热的流入比	214
参考文献	215
B. 切削中的振动	215
B-1 振动的影响	215
B-2 引起振动的各种原因	216
B-2-1 发生与切削无关的振动	216
B-2-2 由于切削而引起的振动	217
B-3 防止振动的方法	218
参考文献	220

第一章 绪 论

§ 1-1 切 削 加 工

所谓切削加工（广义来说为机械加工）是用刀具切削工件的极其常用的加工方法，大致可定义为「首先使刀具接触工件，然后使刀具对工件作相对运动，由于工件内部局部发生较大的应力而引起断裂，把不需要的部分作为切屑而剥离下来，加工出所需形状的崭新表面的成品[⊖]。」

具体地说，除了把车刀、钻头、铣刀等切削刀具和机床联合起来使用的车削、孔加工、铣削等狭义的切削加工以外，还有使用砂轮进行少量切削的磨削、珩磨、超精加工等广义的切削加工。即使用游离磨粒的研磨，在粗加工时，也是以切削为主，只是在精加工时，抛光（由于工件表面的塑性流动而使表面平滑化）才起主要作用。

§ 1-2 切削加工方法的发展

距今约十万年前的石器时代就实现了用手拿着石头或贝壳制作的刀具来削木头或骨头，它与火的使用相并列。掌握切削这一技术，也可以说是识别人类和其他动物的标志。

我们发现巴勒斯坦在纪元前六千年制作的弓形钻，具有今日机床的雏形，它是把刀具和其他工具组合成效率高的切削，就是利用弓和弦把弦缠在带柄的钻头上使之旋转，这就是钻床的祖先。其后，切削工具和机床的发展是极其缓慢的。但是，后来就出现了成为今日机床基础的车床和铣床以及在车床和铣床上使用的切削工具等一并发展起来了。从1750年开始的产业革命使机床

⊖ 个别情况下，也有把切屑作为成品而使用的切削。例如，把木材切削成木屑作为纸浆的原料时就是这种切削。

与切削工具的发展速度急剧提高，当时将木制的车床全部改为金属制的车床。到1850年，牛头刨床、龙门刨床、切齿机床、磨床等今日所使用的各种类型的基本机床雏形大致出齐了。其中，多半是英国研制出来的。

随着这种机床和工具的发展而提高的机械加工技术，对其它机械和产业的全面发展作出了卓越的贡献，成为产业革命的原动力之一。1774年由于威尔金森 (J. Wilkinson) 发明了现代方式的镗床，提高了气缸的加工精度，气缸与活塞间的蒸气泄漏减少了，其结果使瓦特 (J. Watt) 蒸气机的实用成为可能，这一事实是最具有代表意义的一个例子。

另一方面，进入十九世纪以来，经济发展比较显著的美国，因大量生产而引起了种种进步。也就是说，十九世纪前半叶在来福枪部件中导入互换性，规定了制造误差的许可范围即公差，开始采用界限量规。进入廿世纪后，出现 T 型福特所代表的汽车生产传送带，这个潮流一直延续到现在。到十九世纪末，在美国诞生了成为这些基础的生产型铣床、六角车床、多轴自动车床、拉床等大量生产用的机床。

进入廿世纪以来，由于不断地出现了新的刀具材料，切削加工技术就大大发展起来了。十九世纪以前，因为只有碳素工具钢和合金工具钢等耐热性低的刀具材料，切削速度被限制在 10mm/min 左右，后来陆续出现了高速钢 (1898年，美国)、硬质合金 (1925年德国威迪埃 (Widia) 发售)、金属陶瓷 (1955年英国辛托克斯 (Sintox) 发售)[⊖]、陶瓷 (1955年美国研制) 等新的刀具材料，使高速、高效率的切削迅速地成为可能。为了充分地使用这些刀具材料，必须有高速、大马力、高刚度的机床，刀具与机床互相结合共同发展。

图1·1表示用普通车床切削钢材时随着年代的增长实际切削速度提高的情况，为了比较起见，也记入了飞机 (各时代的代表客机) 飞行速度的变迁。从图中可看出：切削加工的速度和经常出

⊖ 从1940年以来，苏联、日本部分使用。

现的较快的飞机相比是有过之而无不及的。

由于这样的高速、高效率化，切削时间显著缩短，结果，在整个加工时间中，装卸工件和更换刀具所需要的时间所占的比例增大了。飞机速度即使进一步提高，假如从家到飞机场所需的时间没有缩短，那么，整个所需

的时间也不会缩短很多。所以高速、高效率化也带来了与最近航空交通事业类似的问题。同时，工资的高涨、熟练工人的减少、青年人从事脑力劳动等倾向也是主要原因。所以，最近的机床在缩短切削的辅助时间方面也在积极进行改进，从自动车床向仿形切削（五十年代已普及）、数字

控制（自1970年以来迅速普及）迈进，从大量生产开始的自动化、省力化倾向不断地急速地向小量生产推广。

现在的自动化是机器按照人们预先指定的命令而运动的自动化，而下一个阶段将使机器具有与人类同样的判断力，即使情况发生变化，机器本身也能在每时每刻寻找最佳条件来切削的“适应控制”。“适应控制”已经部分地使用了。

§ 1-3 研究切削加工的过程

从产业革命以来，机床和刀具（所谓硬件）迅速地发展起来了，与此相反，为了有效地使用这些装备的应用技术（所谓软件），自古以来，由于一直采取以师徒制度为基础的经验为主的技能，所以始终落在后面，因此有必要建立起合理的、科学的切削加工技术。

最早提出解决这一问题的是美国的泰勒（F. W. Taylor）（1859～1915年）。他为了找出最适宜的切削条件，系统地进行了

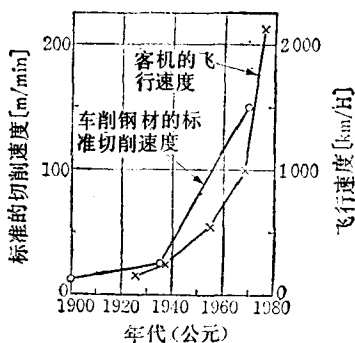


图1-1 钢的实际切削速度和
客机飞行速度的变迁