



数据加载失败，请稍后重试！

精密加工 振动切削

(基础与应用)

〔日〕 隈部淳一郎 著
韩一昆 薛万夫 译
孙祥根 张德惠



机械工业出版社

精密加工 振 動 切 削

— 基礎と応用 —

宇都宮大学教授 工学博士 隈部淳一郎 著

1979年2月 第1刷

実教出版株式会社

*

精密加工 振 動 切 削 (基础与应用)

(日) 隈部淳一郎 著

韩一昆 薛万夫 孙祥根 张德惠 译

*

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)

机械工业出版社印刷厂印刷

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 $15^{3/8}$ · 字数 397 千字

1985年6月北京第一版·1985年6月北京第一次印刷

印数 0,001—9,500 · 定价 3.80 元

*

统一书号: 15033·5844

目 录

本书常用符号

本书所用的国外材料代号与我国近似牌号对照表

第 1 章 关于振动切削	1
1.1 振动切削及其历史	1
1.2 创始振动切削的动机	6
1.2.1 普通切削时切屑生成机理的分析	6
1.2.2 从低温切削谈起	9
1.3 振动切削的创始	16
第 2 章 振动方向与切削效果	19
2.1 走刀抗力方向振动切削	19
2.1.1 切削方法和装置	19
2.1.2 切削机理	21
2.1.3 切削现象	24
2.1.4 特殊情况的应用	29
2.2 吃刀抗力方向振动切削	29
2.2.1 切削方法和装置	29
2.2.2 切削机理	29
2.2.3 切削现象	34
2.2.4 特殊情况的应用	40
2.3 (主切削力方向) 振动切削	40
2.3.1 切削方法和装置	40
2.3.2 切削现象	45
2.3.3 振动切削效果	56
第 3 章 振动切削机理	60
3.1 分析切削机理的方法	61
3.1.1 切削过程中的瞬时摄影	61
3.1.2 切屑的纵向断面形状	63
3.1.3 切削力波形的测定	63
3.2 振动切削机理	65

3.2.1 切削刃的运动机理	65
3.2.2 临界切削速度 v_c 和切削现象的速度特性	69
3.3 工件的动态变化	73
3.3.1 瞬间零位振动切削机理	81
3.3.2 不灵敏性振动切削机理	84
3.4 由不灵敏性振动切削机理所产生的振动切削现象的分析	88
3.4.1 平均切削抗力大大降低的理由	88
3.4.2 平均冲裁力、拉拔力大大降低的理由	89
3.4.3 提高加工精度的理由(刚性化效果)	90
3.4.4 减小表面粗糙度的理由	92
3.5 热脉冲不灵敏性振动切削机理	92
第4章 振动切削的特征及其与普通切削的区别	93
4.1 切削装置的区别	93
4.2 切削力波形与工件的动态变化的差别	96
4.2.1 切削力波形的分类	96
4.2.2 在各种波形的切削力的作用下工件的动态变化	96
4.3 振动切削特有的切削现象与效果	107
4.3.1 精密微量切削	107
4.3.2 高速钢的精密切削	109
4.3.3 淬硬钢的缸面切削	110
4.3.4 镜面刨削	111
4.3.5 精密攻丝	112
4.3.6 小直径深孔的精密镗孔	113
4.3.7 减小车削沟槽的表面粗糙度	114
4.3.8 精密拉削加工	115
4.3.9 能看到金属组织的切削表面	116
4.3.10 得到不氧化、不变色、没有毛刺的切屑	116
4.3.11 淬硬钢的精密车削	118
4.3.12 高速钢的精密车削	119
4.3.13 兼有外圆、内孔和平面磨床功能的振动切削车床	120
4.3.14 超精密加工	121
4.3.15 刀具寿命	121

4.4 新的普通切削法	121
4.5 新的振动切削法	124
第5章 振动切削方法	125
5.1 振动切削与振动塑性加工	125
5.2 外圆的振动切削方法	128
5.3 平面的振动切削方法	132
5.4 孔的振动切削方法	135
5.5 螺纹的振动切削方法	139
5.6 齿轮的振动切削方法	142
5.7 振动切断加工法	144
5.8 振动表面微细加工法	146
第6章 振动驱动装置	148
6.1 振动驱动形式	148
6.1.1 电磁振动型	148
6.1.2 电气—液压型	149
6.1.3 机械—液压型	152
6.1.4 机械型	154
6.1.5 电致、磁致伸缩换能器	157
6.2 换能器	157
6.2.1 镍片式磁致伸缩换能器	157
6.2.2 铁氧体磁致伸缩换能器	158
6.2.3 电致伸缩换能器	159
6.3 超声波发生器	160
6.4 镍片式磁致伸缩换能器与电致伸缩换能器的比较	166
6.5 远距离操纵	169
第7章 切削工具振动系统的设计制造	176
7.1 磁致伸缩换能器	177
7.2 纵向振动振幅放大杆	179
7.2.1 指数函数型放大杆	179
7.2.2 阶梯型放大杆	183
7.2.3 锥型放大杆	187
7.2.4 傅里叶型放大杆	190

7.3 扭转振动放大杆	191
7.3.1 指数函数型放大杆	191
7.3.2 锥型放大杆	195
7.3.3 阶梯型放大杆	195
7.4 弯曲振动杆	197
7.5 振动系统的组成及其连接方法	199
7.5.1 放大杆材料的选择	199
7.5.2 工具材料的选择	200
7.5.3 工具形状	202
7.5.4 放大杆与换能器之间的连接	203
7.5.5 工具的安装方法	204
7.5.6 变换振动方向的连接方法	207
7.6 纵向振动工具及其安装方法	209
7.7 弯曲振动系统工具及其装夹方法	212
7.8 扭振系统工具及其安装	218
7.9 新型振动切削刀架	223
第8章 外圆加工	227
8.1 振动切削瑞士式单轴自动车床的精密车削	231
8.2 使用振动切削椭圆切削车床进行椭圆加工	235
8.3 使用振动切削普通车床进行精密车削	236
8.3.1 使用普通车床时的调整事项	236
8.3.2 使用扭转振动系统刀具的振动切削普通小型车床	237
8.3.3 使用纵向振动系统刀具的振动切削普通车床	238
8.3.4 使用弯曲振动系统刀具的振动切削普通车床	243
8.4 改进振动切削性能的措施	251
8.5 振动切削主切削力的实验式	252
8.6 使用液体静压轴承振动切削车床进行超精密车削	253
第9章 平面加工	259
9.1 使用振动切削普通车床加工端面	266
9.1.1 高速钢的振动端面切削	266
9.1.2 钛的振动端面切削	268
9.1.3 大直径工件的振动端面切削	269
9.2 使用120VLS 振动切削端面车床的端面切削	270

9.3	UGC振动切削端面车床的端面车削	280
9.4	120VLR 振动切削半自动端面车床的端面切削	283
9.5	使用振动切削专用机床进行端面切削	284
9.6	使用振动切削牛头刨床进行刨削	285
9.7	使用振动切削龙门刨床进行刨削	289
9.8	振动切削铣床	303
第10章	孔加工	305
10.1	使用振动切削钻床钻孔	310
10.2	使用振动铰孔机铰孔	323
10.3	使用振动切削镗床镗孔	333
10.3.1	小孔的振动镗削	333
10.3.2	振动切削时镗杆的刚性化效果	335
10.3.3	内径 110mm、深度 100mm 孔的振动镗削	338
10.3.4	内径 110mm、深度 300mm 孔的振动镗削	341
10.3.5	使用振动切削镗床镗大孔	350
10.3.6	使用带液体静压轴承的振动切削车床精密镗孔	351
10.4	使用振动拉床拉孔	357
第11章	螺纹加工和齿轮加工	361
11.1	使用振动攻丝机攻丝	366
11.1.1	10RT 型振动攻丝机	366
11.1.2	台钻式10RT 型振动攻丝机	369
11.1.3	单头多轴式10RT 型振动攻丝机	370
11.1.4	振动攻丝组合机	371
11.1.5	振动攻丝的效果	372
11.1.6	振动攻丝条件和使用效果	378
11.2	使用 20kHz 振动攻丝装置攻丝	382
11.3	使用振动切削螺纹车床车螺纹	383
11.4	振动切削滚齿机	385
11.5	振动切削铣床	386
11.6	振动切削插齿机	386
11.7	振动切削剃齿机	388
第12章	切槽与切断加工	389
12.1	在振动切削车床上精密切槽和切断	391

12.2	用振动拉床切槽	395
12.3	用振动弓锯床切断	401
12.3.1	20kHz 纵向振动弓锯床及其性能	403
12.3.2	20kHz 纵向振动缺齿式弓锯床	407
12.3.3	20kHz 弯曲振动式弓锯床	408
12.3.4	100Hz 振动金属锯床	408
12.4	用振动剪床剪切加工	409
12.4.1	上剪刀在剪切方向上振动的振动剪床	409
12.4.2	上剪刀沿工件表面方向振动的振动剪床	410
第13章	磨料加工	411
13.1	超声波加工	412
13.2	振动研磨	412
13.2.1	KSS 点和KST点	416
13.2.2	KSS 研磨法和KST研磨法	417
13.3	砂轮等效硬度特性	419
13.4	振动磨床	431
13.4.1	纵向振动系统砂轮主轴箱	431
13.4.2	弯曲振动系统砂轮主轴箱	432
13.4.3	扭转振动系统砂轮主轴箱	433
13.4.4	振动磨削机理和效果	434
13.4.5	实例	437
13.4.6	采用振动磨头的磨削装置	437
13.5	振动珩磨机	440
13.6	超声波振动手动油石	441
13.7	超声波振动修整	442
13.8	单一纵向振动系统修整法	444
第14章	振动塑性加工	447
14.1	振动冲裁	448
14.1.1	方法	448
14.1.2	机理与效果	448
14.1.3	振动冲床	451
14.1.4	振动冲裁的现象和效果	453

14.2 振动压缩	455
14.3 振动压印	455
14.4 振动弯曲	456
14.4.1 振动弯曲加工用凸模	456
14.4.2 振动弯曲加工用冲床	457
14.4.3 振动弯曲机理与效果	457
14.5 振动深拉深	459
14.5.1 振动深拉深方法	459
14.5.2 振动深拉深的机理与效果	459
14.6 振动拉丝	465
14.7 振动轧制	463
14.7.1 板材的振动轧制	465
14.7.2 管材的振动轧制	465
论文及其发表的杂志名称	467
专利名称	470
实用新设计名称	472

第 1 章 关于振动切削

1.1 振动切削及其历史

著者曾提倡把历来称之为机械制造方法的这一领域，大致区分为造形加工、变形加工、表面加工和组合装配[⊖]。并且说明了表面加工还可分为力学的加工、热的加工、化学的加工三类。切削、磨削是属于其中的力学的加工，这种力学的加工占有从毛坯加工成所要求尺寸和外形的表面加工的大部分。

热的加工是指以脉冲的形式施加热能的一种加工，包含有电火花加工、电子束加工和激光加工。其中电火花加工早在 1768 年就已经发明了，现在已被广泛应用，但是在力学的加工部门中，把力以脉冲的形式使其有规律地发生作用进行加工的尝试，还是不久以前的事。

著者利用这种脉冲力所进行的研究，是从 1954 年到 1956 年首次进行尝试的，并命名为超声波振动切削。

为了使连续发生的有规律的脉冲力作用到工件上，就要利用另外设置的振动源，使切削工具对着以一定的切削速度 v 运动的工件，以一定的振幅 a 、振动频率 f ，在切削方向上进行正弦波振动，并满足 $v < 2\pi af$ 的关系时才能实现。使切削工具产生振动，是使脉冲力起作用的唯一手段。如图 1.1 (a) 所示，利用另外设置的超声波发生器，使车刀以振动频率 $f = 20 \sim 50 \text{ kHz}$ 、振幅 $a = 10 \sim 25 \mu\text{m}$ 的所谓超声波范围的振动频率和微小振幅沿着切削方向振动进行切削，而在创始的当时，只是着眼于切削装置和车刀刀刃的运动，因而定名为超声波振动切削 (ultrasonic vibration cutting)，它与传统切削 (或称为历来的切削法，也

⊖ 隈部淳一郎《表面加工》(上、下)，实教出版

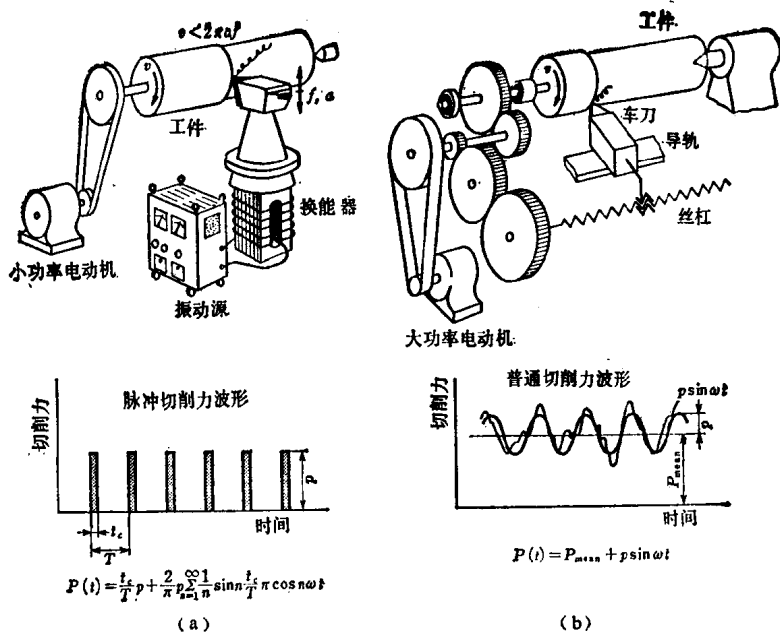


图1.1 振动切削和普通切削的差别

(a) 振动切削 (b) 普通切削

称为普通切削)不同, 由于它是利用过渡现象、依据图中所示的脉冲切削力波形产生切屑的机理, 故称作振动脉冲切削或脉冲切削是比较恰当的。不过, 以往既然已经作了这样的命名, 所以就要对振动切削的称呼作一说明。

振动切削 (vibration cutting) 时, 因为使刀具振动产生切屑的能量, 是用另外准备的振动源(超声波发生器), 除此之外的动力, 只是带动工件按规定的几何学关系运动, 用一个小功率的电动机就足够了。

普通切削时, 如图1.1(b), 由于车刀挤压高速回转的工件, 使车刀产生一定的静位移, 以及利用与该位移相重叠的车刀刀尖的振动以形成切屑, 就需要大功率电动机。也就是说, 把工件加工成要求形状的动能和使刀尖产生振动的能量, 都只能依靠远离刀

架的电动机转子的回转能量来供给，这就是普通切削机床的特点，也是普通切削的思考方法。普通切削的切削力波形，如果用傅里叶级数来近似表示的话，虽说可以形成在 P_{max} 的直流成分上用粗线表示的 $P \sin \omega t$ 的正弦波形，但是由于频率和振幅变化范围较大，形成在 P_{max} 的直流成分上叠加了以细线表示的复杂波形的交流成分。这种无规律而变化范围又较大的振动频率所引起的工件、切削工具的弹性振动现象，以及由于高速回转所产生的大量切削热，都给切削加工带来不良影响。

这种普通切削，在稳态领域内，是把稳定的波形，也就是把实现并维持这种有规律的 $P \sin \omega t$ 波形作为目标，而振动切削是巧妙地利用了过渡现象，它所形成的脉冲形切削力和切削热，却带来各种良好的切削效果，使得用金刚石刀具可以精密切削淬硬钢，用硬质合金刀具可以精密切削高速钢，以及还可以完成其他各种精密加工。利用这种振动切削，将使切削加工的理想，即圆度误差 ≈ 0 、圆柱度误差 ≈ 0 、平面度误差 ≈ 0 、平行度误差 ≈ 0 、直线度误差 ≈ 0 等超精密切削成为现实。

著者探索振动切削，是在 1950 年东京工业大学机械工学科毕业之后、在已故导师海老原敬吉先生的指导下，开始致力于机械加工方面的研究，约经三、四年，从 1953 年到 1954 年开始起步的，而在 1956 年 11 月的岡山地方机械学会临时报告会上，进行了第一次口头发表。那时，曾受到这样的质问：“机械加工时，本来是设法避免切削工具产生振动的，为什么要故意让它振动起来再进行切削呢！”当时，由于受麦钱特 (Merchant) 和肖 (Shaw) 等人所提倡的切削理论的影响，激励人们积极进行研究。但是，当时把需要用动力学方法研究的切削现象进行平均化，再用静力学的方法进行分析。也就是说，在切削动力计算时，测出一个可能是恰当的数值——平均切削力 P_{max} ，把图 1.2 所表示的实际图理想化，形成理想的模型图（图 1.3），试图根据这个模型图再进行静力学的分析。通过把正在变动的切屑生成机理和切削力的连续摄影在停住的一瞬间所得到的一幅画面的分析，来概括研究全部

过程，这在当时是非常勉强的。因此，当时这种振动切削现象，除了作过这种试验并得到证实的那些人之外，还不能被其它人立刻理解。

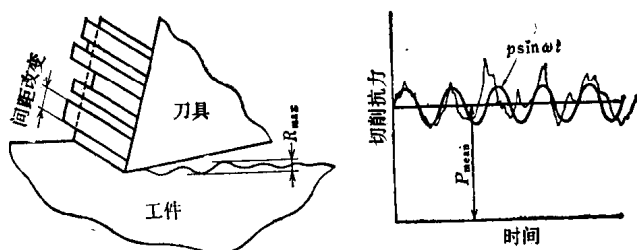


图1.2 切屑形状、表面粗糙度和切削力波形

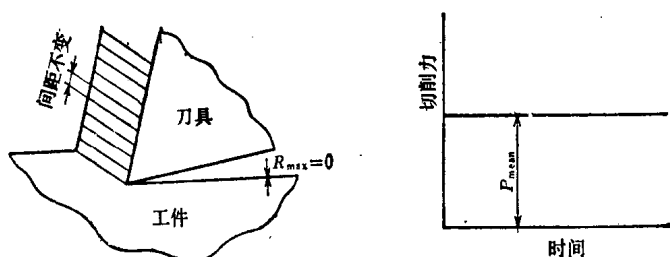


图1.3 把图1.2理想化的模型图(用此图研究切削理论)

众所周知，由于国内外众多的研究人员悉心工作，通过切削理论的研究和文章的发表，已可以说明：“为什么能够切削？是形成了剪切角而后才减小前面摩擦？还是减小了前面摩擦而后才形成剪切角的？”但对于初学者来说，直接了当地就能领会的简明扼要的理论最终还未清楚，直到现在还遗留着未解决的问题。

另一方面，依靠现场的长期经验和试验研究所积累的生产技术的提高，在普通切削方法中发现，采用高速切削可以改善刀具的锋利性。这种方法，有利于缩短切削时间，是降低成本的主要因素。同时，由于必然要产生的明显发热现象而带来的各种弊病，例如，工件发生热变形和降低工具寿命等。这些弊病可以通过研制新的切削液或提高切削工具的高温强度的办法来解决，现在

高速切削化已成了改善切削性的唯一常用的办法。不过,虽说研制出了立方氮化硼等新型刀具材料,但是从陶瓷工具制造出以后,还找不到一般能广泛实用的新型工具,现在实际应用的高速切削也可以说是到了极限。再者,令人感到的是,尽管研究人员、技术人员都在议论用数控机床加工,但是,就其发展现状来看,这种“数控机万能时代”也开始处于停滞状态。应当指出,尽管使工件极力高速回转,限定能进行高速切削的机床类型,集中现代的技术,使各工序的操作得到有效地控制,也还是找不到满意的方法。这表明对历来的传统切削机理和机床的见解,仍然存在着根本性的问题。也就是说,对一直认为切削温度必然要升高的传统切削技术,还要进一步重新认识和重新考虑,开创和建立起本质的切削加工技术的日子已经到来了。

著者在考虑切削加工的微分方程式时,把依据脉冲切削力波形进行切削的振动切削看成是通解,把依据静态成分上叠加交流成分的切削力波形进行切削的普通切削看成是特解。

$$\boxed{\text{切削加工}} = \boxed{\text{通解}} + \boxed{\text{特解}}$$

(振动切削) $\left(\begin{array}{l} \text{高速切削} \\ \text{高温切削} \\ \text{低温切削} \\ \text{反向精密切削等普通切削} \end{array} \right)$

在本书末尾所列举的是著者至今通过口头或学会杂志、同业杂志以及专利公报上陆续发表的有关振动切削(包含振动塑性加工)的文章。著者早就认为,以专利公报发表和以学会发表具有同等的意义,并随着研究的进展,依次申请发表专利。这些文章发表的经过,即发表的年月和内容,说明了迄今振动切削的历史。

在国外,只停留在利用振动稍微改善普通切削的切削性能上,而未曾见到从切屑生成机理来探求切削本质方面研究的发表和同业的动向。因此,实际情况是,既没有考虑到振动频率、振幅与切削条件之间的关系,也没有考虑振动方向和切削方向之间的关系,认为只要加上振动就能得到效果,对主切削力方向以外,应作为特例对待的吃刀抗力方向和走刀抗力方向的振动切

削，也同样看作是振动切削的主流。

1.2 创始振动切削的动机

1.2.1 普通切削时切屑生成机理的分析

从1950年到1953年期间，测定了刀具所承受的平均切削抗力，如同齿轮的齿形分析一样，罗列一些数据，按照展开的数学式，对照静力学的切屑生成机理的分析研究的做法，试图找到某种新的分析资料，为此，著者对直角自由切削时刀尖附近金属组织的变化过程、因滑移线而出现的应力分布状态以及残余应力等，进行了就当时来说是独特的探索性的观测和研究。结果发现，在研究切削机理时，只利用图1.3的模型图，即假定切削机理不随时间改变的静力学方法是不够的，还必须应用动力学的方法进行研究。

切屑形状的观测

用金属显微镜观测切屑形状，并用千分尺测定它的厚度，结果发现：如图1.2所示，不论是切屑厚度，还是剪切间距都是不一致的。

假定切屑厚度 t_2 和剪切角 ϕ 一定，剪切间距 P 的变动情况，则如图1.4所示。由图可知， l_{r1} 、 l_{r2} 、 l_{r3} 是不一致的。它们之所以不一致是因为切削速度是一定的，这就意味着车刀刀尖或工件的

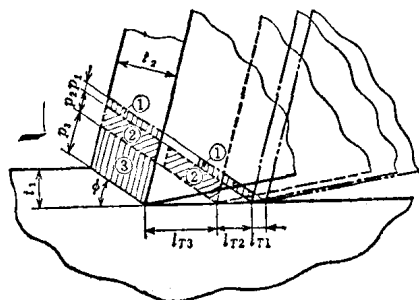


图1.4 不一致的 l_r 和
不一致的间距 P

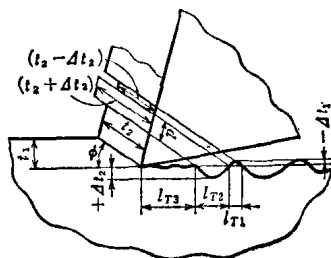


图1.5 l_r 、 t_1 、 t_2 、 P 的不
一致状态(切屑形状和已
加工表面的实际状态)

位置在切削方向上随时间而变动。如果把切屑厚度 t_2 的变动和上述变化重叠起来,即形成图 1.5 所示的状态。也就是说,薄切屑 ($t_2 - \Delta t_2$) 是在切削深度小的 ($t_1 - \Delta t_1$) 情况下形成的,厚切屑 ($t_2 + \Delta t_2$) 是在切削深度大的 ($t_1 + \Delta t_1$) 情况下形成的。这就意味着刀尖或工件,在与切削方向相垂直的方向(吃刀抗力方向)上是随时间而变动的。

已加工表面粗糙度的观测

直角自由切削后,切削方向上已加工表面的粗糙度,如果根据图 1.3 的切削模型图来看是 $R_{\max} = 0$,即切削后的加工表面应该成为一条直线。然而,实际上图 1.2 所示的表面粗糙度 $R_{\max}$ 是可以测出的。

在图 1.5 的直角自由切削中,如果把时时刻刻都在变动的切削深度的变化考虑进去的话,那么它与 $R_{\max}$ 的关系就明确了。例如,以前角 $\alpha = 20^\circ$ 、 25° 、 30° ,对切削宽度为 2 mm、长度为 50 mm 的碳素钢表面进行直角自由切削,测定刀具的后面和工件的接触长度 l mm。如果以 $R_{\max} = l \sin \beta$ 进行计算,其计算值和实测值如图 1.6 所示恰好一致。这就证明了除工件的弹塑性变形之外,刀尖或工件在与切削方向相垂直的方向(吃刀抗力方向)上随时间而变动,并且接触工件。

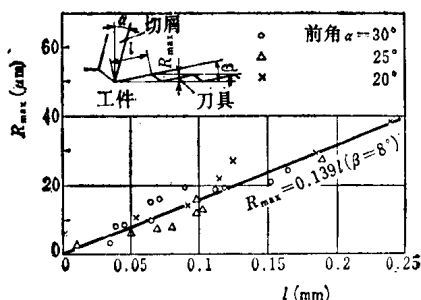


图 1.6 刀具后面接触长度和表面粗糙度的关系

加工表面的性质和状态的观测

刨削时,如图 1.7 (a) 普通切削表面那样,刨刀从接触工件开始到某一长度的距离内,出现光亮表面,之后就形成光亮表面和灰暗表面混杂在一起的加工表面。在出现光亮表面的不稳定区

⊖ 原文为 $(t_1 + \Delta t_1)$, 疑是 $(t_1 + \Delta t_2)$ 之误。——译者注