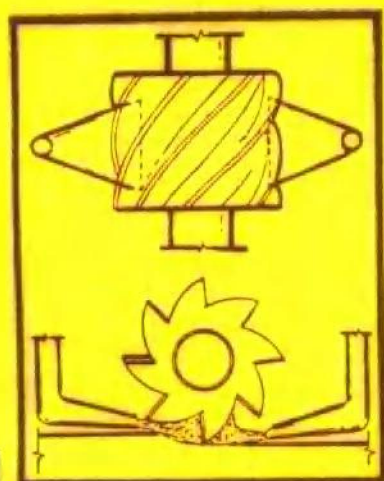


切削液与磨削液

櫻井 俊男 主编
〔日〕 广井 进 著
山中 康夫



机械工业出版社

本书在扼要提及切削、磨削原理的基础上,论述了切削、磨削液的效果与作用机理及其影响因素;全面介绍了切削液和磨削液的种类、组成、选择运用以及评价其性能的各种试验方法。在实际应用方面,对切削液和磨削液的使用管理、安全卫生、环境保护、废液处理等都作了详细说明。最后,还列表归纳了使用中出现的問題及其原因和对策。

本书内容丰富、新颖,可供从事金属切削、磨削加工和切削、磨削液生产与管理的工程技术人员及大中专院校相应专业师生参考。又因本书切合实际,简明易懂,故从事上述工作且有一定实践经验的技术工人亦可从中得到教益和启示。

切削油剂と研削油剂

桜井 俊男 監修

広井 進 共著

山中 康夫

株式会社 幸書房 1982年初版

* * *

切削液与磨削液

桜井 俊男 主编

〔日〕 広井 進 著
山中 康夫

刘镇昌 译

李名儒 校
刘 忠

*

责任编辑:高文龙

封面设计:刘 代

*

机械工业出版社出版(北京阜成門外百万庄南里一号)

(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 $8^{1/2}$ · 字数 220 千字

1987年10月北京第一版·1987年10月北京第一次印刷

印数 0,001—3,750 · 定价:2.75 元

*

统一书号:15033·6969

译者的话

在切削和磨削加工中,运用切削液和磨削液是提高加工效率和工件质量的重要手段。随着机械工业的不断发展,其作用愈来愈受到人们的关注。

在切削液和磨削液的应用研究方面,日本是发展较快、走在前列的工业大国之一。早在1962年就制定了有关切削液的日本工业标准(JIS),并在1970年和1980年进行过两次修订;每年有许多研究论文发表;专著也已出版过好几种。本书原著是有关切削液和磨削液的最新版本。内容丰富、新颖,切合实际,简明易懂。特别是能着眼于生产和社会形势的发展,对使用管理、废液处理、安全卫生、环境保护等作了较详尽的解说。

我国目前已着手积极开展切削液和磨削液的研究,有关这方面的国家标准也正在逐步完善。尤其是近几年来“以水代油”的研究和应用已开始风行;但还缺乏经验,存在不少问题。翻译本书正是希望借“他山之石”来配合国内正在掀起的这场技术改革。

译者在翻译过程中遇到的最大困难是有关切削液和磨削液的专门术语。与其说是因为中日两国分类方法和语言习惯上的差异,毋宁说是因为国内标准不全,尚无权威性的统一命名。这就迫使译者不得不斗胆译出些尚不大为人熟知的字眼来。为便于读者理解和鉴别,特作如下说明。

(1) 原著指出,在JIS中“切削液”一词是广义的,包括磨削液等。这在某种程度上符合国内习惯,故译本予以沿袭。但原著在某些章节系将切削液和磨削液的有关内容分别叙述,另当别论;除此而外,若无特殊说明,凡提到“切削液”一词均请按广义理解;

(2) 原文的“不水溶性切削油剂”译为“油基切削液”,有时为行文方便直呼“切削油”;

(3) 原文的“水溶性切削油剂”译为“水基切削液”。现

将其下属品种的名称列表对照如下:

日文原称	エマルジョン型切削油剂	ソリユール型切削油剂	〔ケミカル〕ソリユーション型切削油剂
英译名	Emulsion type cutting fluids	Soluble type cutting fluids	〔Chemical〕Solution type cutting fluids
中译名	全称 乳化型切削液	可溶型切削液	〔化学〕溶解型切削液
	简称 乳化液	可溶液	〔化学〕溶解液
	别称* 乳状〔切削〕液	半透明〔型切削〕液	透明〔型切削〕液

• 此种命名法系根据切削液的外观, 国内有这样称呼的, 本书未采用。

(4) 关于“原液”和“使用液”: 油基切削液的原液就是它自身; 水基切削液的原液系指稀释前的母液。“使用液”是“现场使用着的切削液”的简称。

关于单位制, 按照惯例译文不作变动。但对其中不符合我国法定计量单位者均在书末附表中与法定计量单位对照列出, 并附有换算公式。

原著中的个别疏漏均与作者商榷核实后予以纠正, 不再另加译者注。

在翻译过程中曾得到华中工学院顾问教授(原日本国长崎大学教授)寺島健一先生、原著作者広井 進先生和山中 康夫先生的热心指教。华中工学院叶康民教授和武汉材料保护研究所李少正高级工程师也曾给予过帮助。最后, 承蒙华中工学院刘忠副教授和国营内蒙第二机械制造厂李名儒高级工程师仔细校阅译文(分别校阅第1~2章和第3~8章), 于此一并表示诚挚的谢意。

译者在此特别感谢我的导师华中工学院陈日曜教授的举荐和支持; 特别感谢本书责任编辑高文龙同志在文字表达方面所给予的指教。

尽管如此, 限于译者的学识和外语水平, 译文仍恐难免差错, 敬请读者诸君不吝赐教。

刘镇昌

1986年2月

序 言

接受委托编写综合润滑技术丛书之一的《切削液与磨削液》是在1975年春天。两年后好容易算是脱稿了，可是在1977年，水基切削液的 N -nitrosamine（亚硝酸胺）问题被提了出来。这是个关系到切削液接触者安全卫生的重要问题。于是，估计到水基切削液的组成会有突然变化，转送付印的事情便搁置下来。在这个问题上，由于“全国工作油剂工业组合”（通产省认可的工作油剂制造厂商的团体）作出了停止生产和销售用亚硝酸盐与烷基醇胺类混合成分制成的制品这一自主规定，以及寻求新的切削液来取代该类制品的指示，新型切削液的开发研究便蓬勃发展起来。尤其是在1980年JIS (Japanese Industrial Standard, 日本工业标准)修订案中，看到了从JIS中删除化学溶解型切削液的初步决定，这样，由于按照新JIS修改原稿的缘故，本书便成为综合润滑技术丛书中最后完稿的一册了。为此，仅向读者表示歉意。

本书就切削液和磨削液，特别是就其组成成分、试验方法、性能、效果等诸方面列举了许多实例和图表，并作了通俗易懂的解释。期望它作为从事机械加工的人员和学生们的一本入门书而起作用。

值本书付印之际，特向校阅本书的编辑委员长、东京工业大学名誉教授樱井俊男先生、ユシロ化学工业株式会社社长新宅顺三先生、协同油脂株式会社副社长影山八郎先生和在编辑过程中付出过极大努力的幸書房原田弘社长以及有关诸君致以深厚的敬意。

山中 康夫

广井 进

1982年5月

目 录

1 切削液的作用与效果	1
1.1 切削液的使用目的.....	1
1.2 切削原理.....	2
1.2.1 切屑形成机理.....	3
1.2.2 积屑瘤.....	4
1.2.3 剪切角与切削温度.....	7
1.3 切削液的作用机理及其特性	11
1.3.1 切削液向刀尖的渗透	11
1.3.2 润滑机理	13
1.3.3 对积屑瘤的控制作用	17
1.3.4 冷却机理	23
1.3.5 关于切削液作用机理的新观点	29
1.4 切削液的效用	30
1.4.1 车削加工	30
1.4.2 铣削加工	36
1.4.3 拉削加工	40
1.4.4 切齿加工	41
1.4.5 钻削加工	43
1.4.6 铰削加工	48
1.4.7 攻丝与螺纹切削加工	51
1.4.8 供液方法	53
参考文献.....	56
2 磨削液的作用和效果	59
2.1 磨削液的使用目的	59
2.2 磨削加工的特点	61
2.2.1 由磨粒进行的多刃微细切削	62
2.2.2 磨削是速度非常高的切削 (高速切削).....	66
2.2.3 磨粒切削刃的自锐作用	69

2.3 砂轮	73
2.3.1 磨料	73
2.3.2 粒度	75
2.3.3 硬度	78
2.3.4 组织	79
2.3.5 结合剂	79
2.3.6 砂轮的表示方法	79
2.4 磨削液的作用与效果	82
2.4.1 磨削液的作用	82
2.4.2 磨削液的效果	86
2.4.3 有关因素对水基磨削液效果的影响	95
2.4.4 磨削液对于新的磨削加工方法和新磨料的效用	99
2.4.5 供液法的种类及其效果	103
参考文献	111
3 切削液和磨削液的种类	113
3.1 日本工业标准 (JIS) 对切削液的分类	114
3.2 油基切削液的组成	119
3.2.1 矿物油	119
3.2.2 油性剂	120
3.2.3 极压添加剂	121
3.2.4 其它添加剂	123
3.3 水基切削液的组成	123
3.3.1 乳化型水基切削液 (JIS W1 种)	124
3.3.2 可溶型水基切削液 (JIS W2 种)	125
3.4 气体状切削剂	128
参考文献	128
4 切削液和磨削液的选择原则与供液法	129
4.1 油基切削液与水基切削液在使用上的区别	131
4.2 切削液的选择原则	137
4.3 磨削液的选择原则	144
4.4 选择切削液的经济性考虑	146
4.5 供液法	154

4.5.1 普通供液法	155
4.5.2 喷雾供液法	160
4.5.3 手工供液法	161
参考文献	162
5 切削液和磨削液的性能评价	163
5.1 在实验室评价切削性能的切削试验	163
5.2 在实验室评价磨削性能的磨削试验	168
5.3 为评价第二性能的物理化学试验	174
5.3.1 JIS 规定的性状试验项目	174
5.3.2 JIS 以外的性状试验项目	184
参考文献	200
6 切削液和磨削液的管理	201
6.1 切削液和磨削液的保管	201
6.2 油基切削液和磨削液的使用液管理	202
6.3 水基切削液和磨削液的使用液管理	205
6.3.1 浓度管理	207
6.3.2 防锈管理	208
6.3.3 防腐管理 (防止腐败的措施)	210
6.4 切削液和磨削液的净化方法	218
参考文献	221
7 切削液和磨削液的安全卫生措施与环保问题	222
7.1 切削液的安全卫生问题	223
7.1.1 切削液 (制品) 的安全性	223
7.1.2 切削液引起的皮肤疾患 (皮肤炎)	227
7.1.3 切削液引起的呼吸器官损害	232
7.2 切削液的废液处理	232
参考文献	251
8 切削液和磨削液使用上的故障分析	252
8.1 切削加工方面的问题	252
8.2 磨削加工方面的问题	255
8.3 使用管理方面的问题	257
8.4 安全卫生方面的问题	259
参考文献	261
本书所用非法定计量单位及换算关系表	262

1 切削液的作用与效果

1.1 切削液的使用目的

钢铁是支撑现代机械文明的主要材料。从机械、电气、汽车、船舶、铁路到日常生活的各方面，到处都可以看到钢铁制品。以钢铁为材料，可以用各种各样的方法加工成人们所需要的形状，但在金属加工领域内，切削加工与塑性加工是应用最广泛的加工方法。

切削加工是用比工件材料硬的刀具切去材料的无用部分，从而把工件加工成所需形状的作业。因为是用钢去切削本来就很硬的钢铁材料，刀刃很快就会钝化而变得不能使用。加之在切削区因材料变形而急剧发热，刀刃与高温区接触，一方面会与切屑粘结，同时自身也会逐渐被熔化。如果为了提高工作效率而加快切削速度，或增大进给量和切深，愈是这样则刀刃的钝化就愈快。提高加工效率、经济地得到符合要求的制品是加工技术人员永无休止的追求。为此，人们试图开发既较硬、又能耐高温的刀具材料。随着碳素钢→高速钢→硬质合金→陶瓷等刀具材料的相继问世，并不断取得实际成果。每一次刀具材料的变革，都带来加工效率的突飞猛进。

新型刀具材料的开发和使其应用成为可能的机床的改良，促进切削加工效率飞速地提高。在碳素钢时代，技术人员的经常性工作是谋求尺寸精度和刀具耐用度的提高（对碳素钢刀具而言，即便是少许也好）。因为刀具损伤的主要原因是刀尖处在高温之下，为了降低刀尖温度，人们试验了浇水的办法。1883年F. W. Taylor¹⁾曾报告指出：在切削区大量浇水可以使切削速度在原有的基础上提高30~40%。这就是当时人们进行这种水冷尝试的证据。人们自古以来就知道油对于防止粘结、磨耗和减少摩擦

很有效,在切削区注入油就能获得光洁的已加工表面。因此,在低速加工时使用了动、植物油。

往切削区注入水、油(切削液)等,从而延长刀具耐用度、提高加工尺寸精度虽说是基于经验的事实,但这些效果至今仍然是人们对切削液寄予的主要期望。今天,在切削液的使用目的方面,除了上述的主要目的之外,尽管还加上了冲走切屑、防止工件和机床被锈蚀等操作上的使用目的,但作为切削加工的辅助手段、改善材料的切削加工性这一主要目的并未改变。这里之所以说是辅助手段,因为切削加工起主要作用的终究是刀具和机床,加工尺寸精度的好坏是由这两者和加工条件所决定的,使用切削液只是在这些最佳条件下保证切削加工顺利进行的一种手段。希望靠切削液去解决因刀具、加工条件等的不适当而导致的问题是没有道理的。在这方面,切削液的作用是有限的。

关于切削液的文献资料,据认为最早是在1868年W. H. Northcott²⁾所写的关于在车削加工中切削液的效果的论述。从那以后,随着机械加工的进步而不断发展,切削液的种类和用法也多样化起来。在日本,特别是第二次世界大战以后,随着机床的再度输入,国外的新型切削液亦被引进。这以后的30年间,在切削液方面取得了惊人的进步和发展。1961年制订了日本工业标准,经过1970年和1980年的两次修订成为现在的样子。对此,将在第3章、第4章叙述,本章仅论及切削液的作用和效果。

1.2 切 削 原 理

切削液怎样在刀具的刀尖处起作用 and 发挥效果?为什么?弄懂这个道理是使用、管理切削液的基本问题。对于这个问题,迄今为止已经进行了大量的研究,虽然阐明和解释了一些现象,但远不是有关切削液的作用机理的所有问题都弄清楚了,有待今后继续研究的遗留课题还不少。有关探明切削液作用机理的研究,近30年来之所以能急速进展,是切削加工技术人员在这方面所作的不懈努力的结果。下面就对与切削液的效用有关的切屑形成

机理、积屑瘤等切削原理问题作一简要叙述。

1.2.1 切屑形成机理

切屑的形状有切削钢时常见的带状连续切屑和切削铸铁时排出的断片状切屑。

切削钢料时，用硬质合金刀具高速切削所生成的切屑的背面是光滑的，而用高速钢低速切削时所得切屑的背面常见到粘附物。这是粘附在刀刃附近的积屑瘤脱落后附着在切屑背面的。Ernst 和 Merchant 从实用的观点出发将切屑分为下述三类（参见图 1.1）：

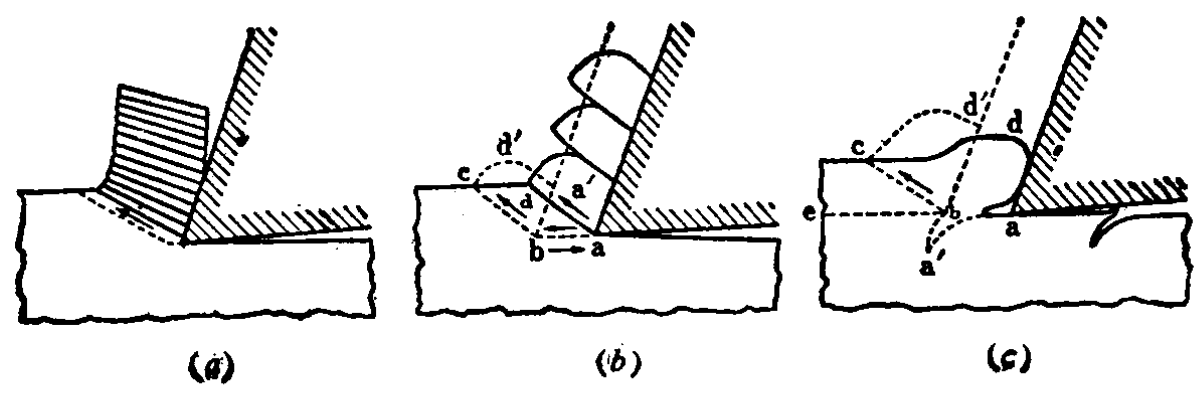


图1.1 切屑形成机理
(a) 带状 (b) 节状 (c) 撕裂状

- 1) 连续切屑——带状；
- 2) 伴有积屑瘤的连续切屑——有积屑瘤；
- 3) 不连续切屑——节状、撕裂状[⊖]、崩碎状。

进一步观察不连续型切屑，虽有节状、撕裂状和崩碎状三类，但崩碎状切屑只在特殊场合出现，通常被观察到的多为节

⊖ 原文为“むしワ（雀ワ）形”，有的日文书（如臼井英治著《切削・研削加工学》）又叫“むしれ形”。译成英文是“tear type”。按日文むしワ（或むしれ）原意为揪，拔，薅；撕掉。按英文tear意为撕裂，扯破；拉（拔，撕）掉。故译为“撕裂状”。其形成特点是前刀面摩擦阻力大，易粘刀（冷焊），切屑有不规则的侧向膨胀，已加工表面上有撕裂口。严格说来，这种分类法并不是根据切屑本身的形状特点。“撕裂”二字旨在表达原文“むしワ”所描述的切屑流出不畅（几乎是被薅掉的）、已加工表面出现撕裂口的这种加工状态。国内编写的切削原理书中无此种类别。——译者注

状、撕裂状的混杂形态。节状切屑常见于切削铸铁、黄铜时，撕裂状切屑则多见于低速切削软钢、纯铜、铝之类粘性材料的场合。切削象软钢之类比较富有延展性的材料时，根据前角和切深的不同分别出现带状、带状和撕裂状三种形态（图 1.2）。

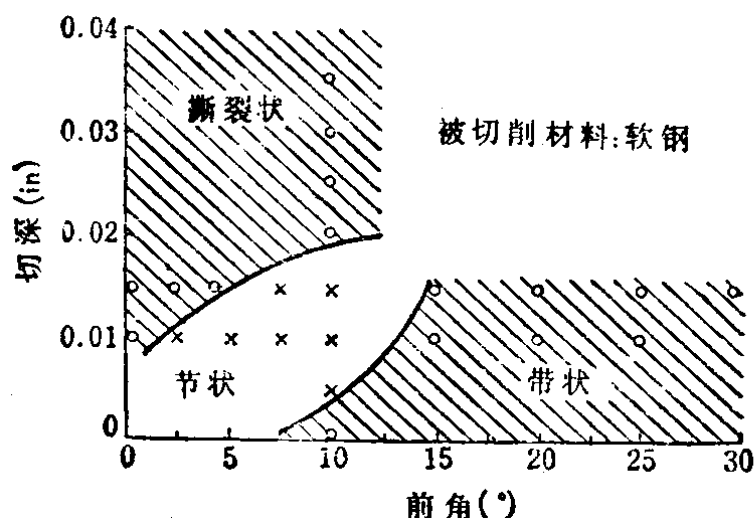


图1.2 切屑的三形态与前角、切深的关系

受被加工材料性质、刀具形状、切削条件等控制的这种切屑形成机理上的差异与切削温度、切削力、积屑瘤等现象相互关联着，最终影响刀具耐用度和已加工表面粗糙度。即使在考虑切削液的适用性和效果方面，切屑形成机理上的差别也是重要的。例如，像铸铁之类的脆性材料，因为容易形成节状切屑，故刀尖温度低，积屑瘤也少见，所以通常进行干切削。

在排出不连续切屑的场合，由于断续的节状、撕裂状切屑的影响，已加工表面会变粗糙；即便是形成连续切屑的场合，也会因为积屑瘤的反复生成和脱落而使已加工表面质量恶化。

1.2.2 积屑瘤

在用 100 m/min 以下的速度切削软钢之类的粘性材料时，可观察到切削刃附近粘附上比被加工材料硬的层状物。它反复地不断生成和脱落，同时代替真实切削刃进行切削。如图 1.3 所见，在刀具刀尖像鼻子一样突出、前端呈圆形的附着物称为积屑瘤。积屑瘤的生成机理被认为是：切屑底层的金属原子与刀具前刀面的金属原子由于亲和力而相互粘结，即使切屑已流走但仍然薄薄

地残留下一层金属原子层，如此逐渐堆积而形成积屑瘤。它之所以比被加工材料硬，可以认为是由于加工硬化和呈层状组织的缘故。积屑瘤生长到某种程度后便会遭到破坏，一部分被切屑带走，一部分残留在已加工表面上。生成脱落的周期约 $1/10 \sim 1/200 \text{ s}$ （图 1.4）。



图1.3 积屑瘤

- ①—切屑 ②—工件 ③—积屑瘤
④—残留在切屑上的积屑瘤碎片
⑤—残留在工件上的积屑瘤碎片

观察到的积屑瘤的前角多为 $30^\circ \sim 40^\circ$ 。因此，前角在 $30^\circ \sim 40^\circ$ 以上的刀具积屑瘤附着困难。有时，在用前角小的刀具加大切

深切削的场合，由于刀具刀尖上附着了积屑瘤的缘故，显示出与加大前角时同样的效果：切削力变小，刀尖受到保护，刀具耐用度得到延长。这是积屑瘤的生成和附着起到有利作用的例子。但是，如果切深小时，由于是带有凹凸缺口的圆角形刀尖进行切削，结果使已加工表面粗糙度变坏。若积屑瘤脱落而残留在已加工表面上，则其粗糙度将更加恶化。

进给量(mm/rev)

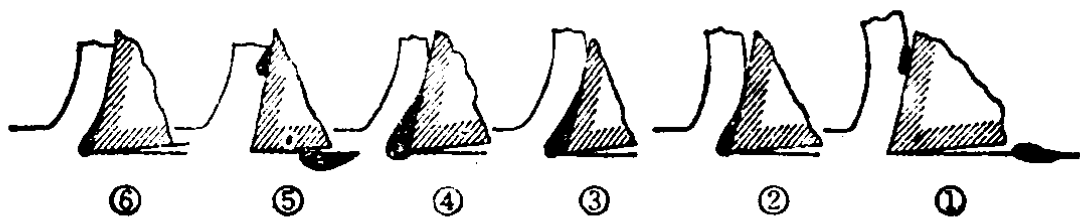


图1.4 积屑瘤的生成、脱落过程

如图 1.5 所示，由于积屑瘤的附着造成切深加大，使尺寸精度难于获得。伴随着积屑瘤的脱落，由于刀尖的缺损（图 1.6）、脱落碎片与刀具摩擦等，往往使刀具加速磨损。这是积屑瘤起有

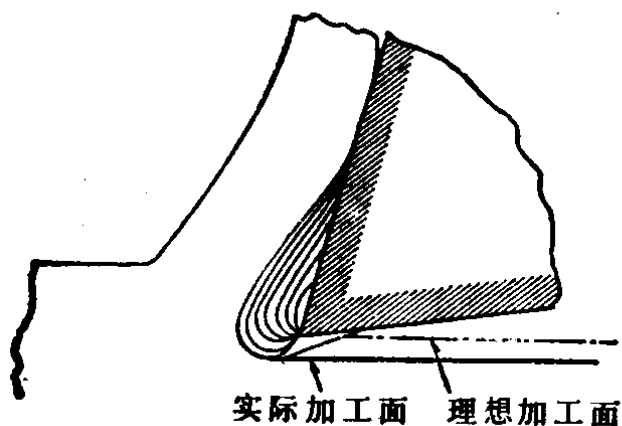


图1.5 积屑瘤的存在使产品尺寸难于控制

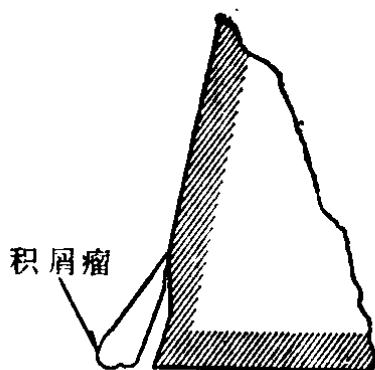


图1.6 伴随着积屑瘤脱落的刀具缺损

害作用的例子。在低速微量切削和要求控制已加工表面粗糙度的拉削等加工中，不希望发生积屑瘤。在铰削等精加工中也必须避免。在切削软钢、不锈钢、铝以及铜合金之类粘性材料时，积屑瘤容易生成；而在切削铸铁、青铜之类脆性材料时难于附着。此外，在刀具材料的种类与被加工材料愈相近时，由于亲合力愈强的缘故，积屑瘤愈易于发生；材料愈是不同则发生愈困难。对软钢而言，碳素钢刀具的积屑瘤大；高速钢、硬质合金、陶瓷刀具的积屑瘤顺次减小。

根据积屑瘤的生成机理，当切削区温度达到被加工材料的再结晶温度以上时，积屑瘤就会被熔化而消失。当切削速度提高到 100 m/min 以上时，即使是切削软钢，已加工表面质量也会变好，这正是因为积屑瘤消失的缘故。但是，一般说来，高速钢刀具的使用速度范围远远达不到如此程度，因此，可以认为必定会附着积屑瘤。图 1.7 所示是对各种钢材进行轻负荷切削时积屑瘤消失的临界切削速度。进给量越小，则切削速度越是必须提高。一般在 $20\sim 50\text{ m/min}$ 的切削速度下积屑瘤高度最大（图 1.8）。

抑制积屑瘤生成的其它方法是使防止切屑底层与刀具前刀面发生粘结的物质介入其间。供给含有极压添加剂的切削液能抑制积屑瘤的生成就是这个道理。

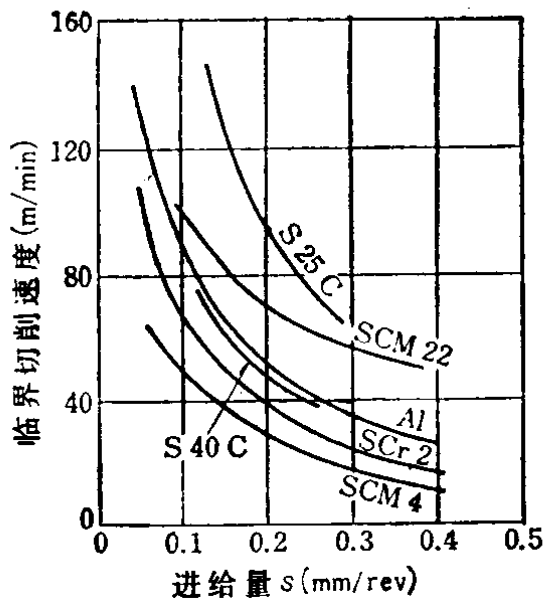


图1.7 积屑瘤消失的临界切削速度（大越，佐田）

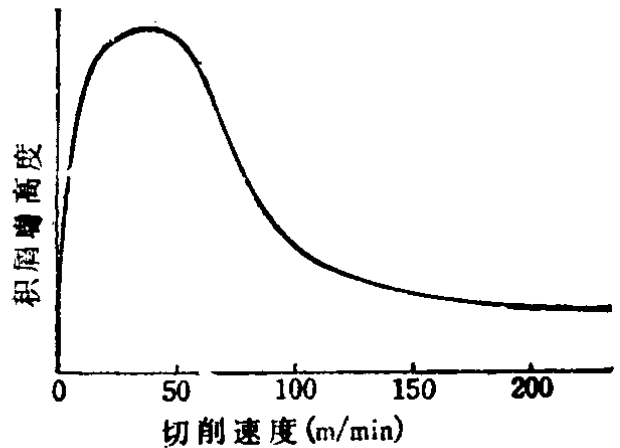


图1.8 积屑瘤高度随切削速度的变化

1.2.3 剪切角与切削温度

切削顺利进行时，排出比较薄的卷状切屑，切削力也小。把刀具与被加工材料、切屑之间的关系简化，以二维切削模型来考察，则如图1.9所示那样。假定切削时产生连续的带状切屑，变形仅仅发生在剪切面上。根据切深 t_1 对切屑厚度 t_2 之比（切削比 $\gamma_c = t_1/t_2$ ）与剪切角 ϕ 之间的几何关系，下式成立：

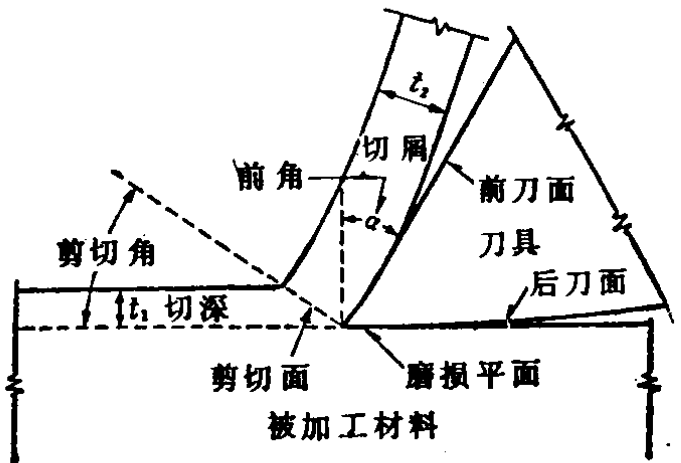


图1.9 二维切削模型

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{(t_1/t_2) \cos \alpha}{1 - (t_1/t_2) \sin \alpha} = \frac{\gamma_c \cos \alpha}{1 - \gamma_c \sin \alpha}$$

式中 α —— 刀具的前角。

根据上式，如果测定了 $\gamma_c(t_1/t_2)$ ，即可知剪切角 ϕ 。这个剪切角的大小是切削理论上的重要参数，对此发表过许多理论研究论文。

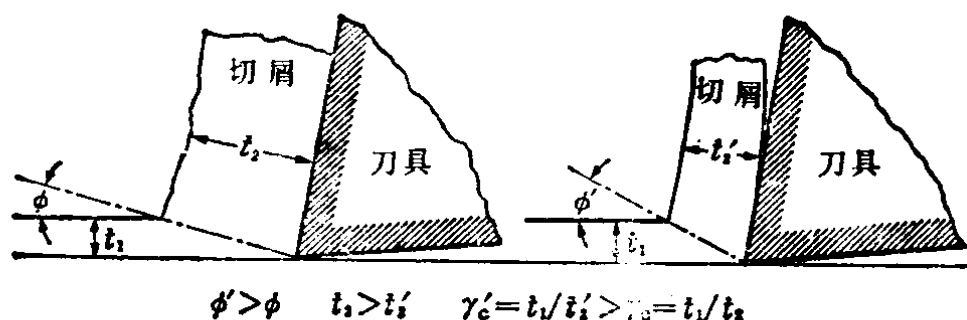


图1.10 剪切角与切削比之间的关系

如果剪切角变大，由图 1.10 所见可知：

- 1) 切屑厚度 t_2 减小，切削比 γ 变大；
- 2) 剪切面变短，剪切能量减少（发热和所需动力减少）；
- 3) 根据切削力理论作出的计算，刀具前刀面与切屑的摩擦系数减小，切屑与刀具的接触长度减小。

剪切角不但随被加工材料的不同而异，如图 1.11 所见到的那样，也随刀具前角和切削速度的不同而变化。又，一旦供给有效的切削液，则刀具与切屑的接触长度就减小，剪切角就变大，这也是众所周知的。

图 1.9 是假定剪切滑移集中发生在剪切面上的分析。实际上如图 1.12 所示，变形在广泛的区域内发生。切削功的大部分虽然消耗在剪切区（1）的塑性变形及剪切滑移上，但除此以外，对于积屑瘤的附着和脱落区（2）、刀具与切屑的滑动摩擦区（3）、刀具与已加工表面的滑动摩擦区（4）也必须考虑。通常刀具与已加工表面的滑动摩擦很小，但一旦刀具磨损，摩擦就会增大，有时甚至可达总能量的 5~10%。切削功中能量的 1~3% 以残余应力的形式残留在被加工材料或切屑中，而 97% 以上转变为热。发生热的 2/3 是在剪切区中产生的，其余 1/3 是由刀具与切屑、刀具与已加工表面的滑动摩擦产生的。发生热的大半被切屑带走，有相当一部分贮留在刀具上（图 1.13⁴⁾）被积蓄下来，导致刀尖温度上升。

准确地知道切削区的温度是困难的。图 1.14 所示为 Loewen

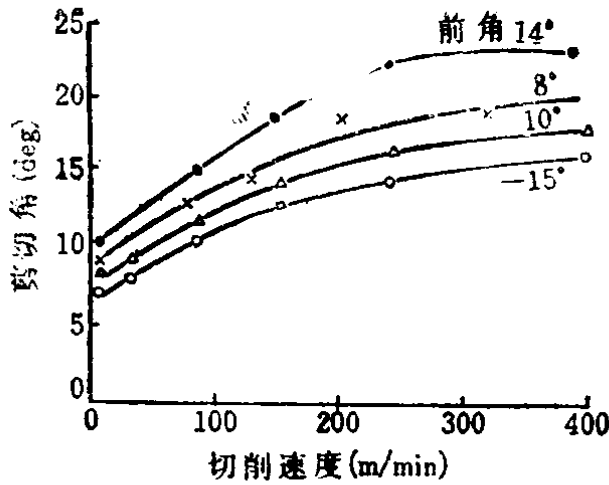


图1.11 切削速度与剪切角的关系 (竹山)

被加工材料: 碳钢(含碳量0.18%) 刀具: SI硬质合金 (Var, 0, 7, 0, 0, 0, 0) 进给量: 0.076mm/rev

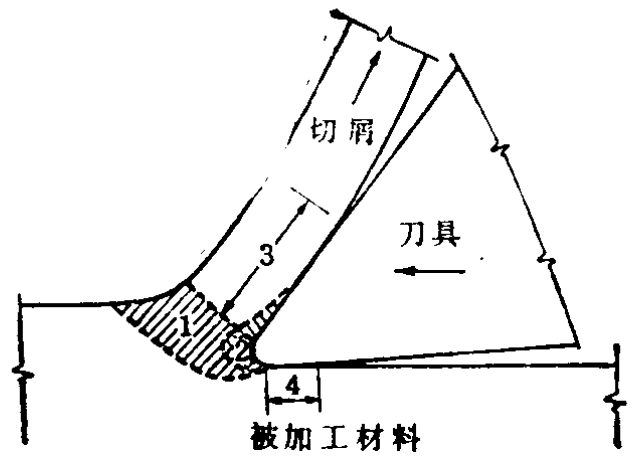


图1.12 金属切削中的剪切区和滑动摩擦区

1—一次变形区(剪切应力效应) 2—二次变形区(积屑瘤) 3—一次滑动摩擦区(刀具—切屑间) 4—二次滑动摩擦区(刀具—被加工材料间)

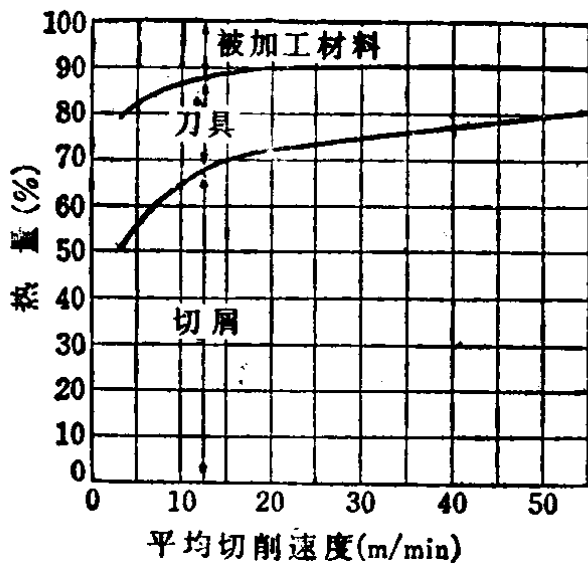


图1.13 切削热分布的实验值
Dow Metal的钻削试验,
进给量0.23mm/rev

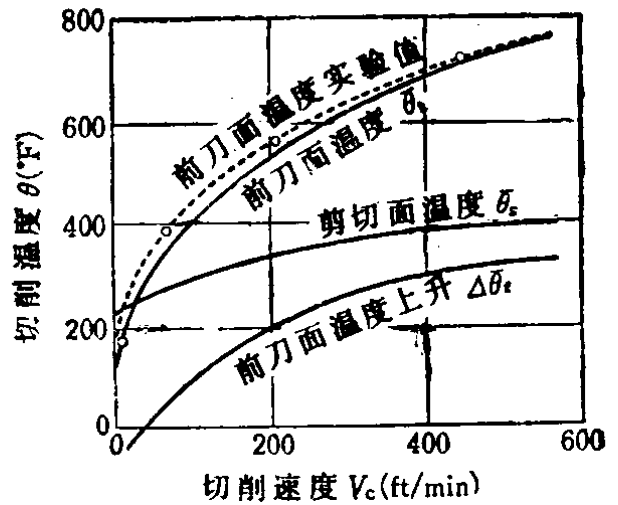


图1.14 切削温度与切削速度的关系
SAE B1113 硬质合金 S类 二维
切削 $\alpha = 20^\circ$ $f_1 = 0.058\text{mm}$

和 Shaw⁵⁾ 关于前刀面平均温度的理论分析与实测结果。如果按照这种分析, 切削温度的增加值正比于切削速度的 $1/2$ 次方。如图 1.13 中所见到的那样, 因为热量的大部分被切屑带走, 刀具温度的实际上升是缓慢的。另一方面, 也必须考虑刀具的蓄热。