

2
机械制造
实用新技术丛书



粟 枯 主编

高速拉削工艺

贾成元 桂挹青 陆培庆 等编著



570.6

国防工业出版社

内 容 简 介

高速拉削是一项新的工艺技术,六十年代以来,工业发达国家对此进行了研究和试验,取得了较好的成果。本书对高速拉削的机理、如何提高拉削表面的质量、拉削速度与表面光度、刀具寿命的关系等作了较系统的阐述,同时对高速拉床、高速拉刀和典型零件的拉削工艺作了详细介绍。

本书可供从事机械制造的工程技术人员和工人以及大中专院校机械制造专业的师生阅读参考。

高速拉削工艺

机械制造实用新技术丛书之二

栗 枯 主编

贾成元

桂挹青 等编著

陆培庆

责任编辑 宋桂珍

*

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

*

850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张 $3\frac{1}{4}$ 82千字

1984年12月第一版 1984年12月第一次印刷 印数: 0,001—8,800册

统一书号: 15034·2845 定价: 0.66元

作者的话

现代航空发动机制造是机械制造业的一个重要方面，具有机械制造的基本特点。它又是技术集约性的工业，集中应用了很多新的技术和新的工艺，其中多数对于机械制造业具有普遍推广的价值。七十年代末，我国从英国引进了斯贝 MK202 发动机及其制造技术，同时又有选择地引进了一些先进的机床设备。这项技术在一定程度上比较完整地反映了近代航空发动机制造的先进水平，通过生产实践也证明了这一点。

为了交流的方便，也为了能有更多的人有机会了解这些制造技术，我们整理编写了这套资料，命名为《机械制造实用新技术丛书》。所以这样命名，是因为我们在编写中遵照了下述原则：

1. 实用性。尽量避免一般性的理论叙述，力求使读者能较快的在实践中运用；

2. 先进性。我们只选择了那些更新颖更有意义的资料；

3. 揉合了我们在斯贝发动机试制工作中的实践经验，还综合了不少有价值的参考资料。

作者期望本套丛书对机械工业，特别是航空发动机制造行业的人们有所帮助，这将是对我们最大的鼓舞。

由于我们视界较窄，水平有限，错误缺点难免存在，欢迎读者批评指正。

本丛书由栗祜同志主编。参加审校工作的主要有：唐宏霞、钟礼治、胡贤惠、谭杰巍、王克强、姜仁忠等同志。

在本丛书编写和出版的过程中，王德荣、黄家豪、郑宝湖、郭治国、姚静梅等同志提供了许多宝贵意见，并参加了审校。还得到了国防科工委、航空工业部有关领导和同志们的大力支持及热情帮助，他们是魏祖冶、陈少中、任家耕和贾克琴、张汉生等

IV

同志。

高速拉削是一门新兴的工艺。这种工艺对近年来日益发展的难切削合金的拉削，具有特别重要的意义。我国还只是开始研究。作者希望通过本书的出版对高速拉削工艺在国内的应用推广能有所帮助。

本书由贾成元、桂挹青、陆培庆、刘普（拉刀设计部分）、于佩贤（叶片拉削工艺部分）编写，唐宏霞审校，栗祜终审定稿。

本书参阅了范茂祥、王德荣、魏永胜、谭美田等同志的文章和试验报告。

谨对在本书编写和出版过程中给予支持和帮助的同志表示衷心谢意。

作者于西安
国营红旗机械厂

目 录

绪论	1
一、高速拉削的机理	3
(一) 拉削时的表面鳞刺现象	5
(二) 高速拉削的试验	10
(三) 高速拉削的定义	17
(四) 拉削速度与拉刀寿命的关系	19
二、高速拉床	26
(一) L6510型卧式高速拉床	31
(二) RAW16×6300×500型卧式高速侧拉床	33
(三) SRHE22×6000型卧式高速侧拉床	38
(四) XS30-96型立式高速外拉床	50
三、高速拉削拉刀	59
(一) 拉刀的结构形式	59
(二) 拉刀的安装	61
(三) 拉刀的材料及其热处理	62
(四) 拉削方式的选择	63
(五) 拉刀的几何参数	65
(六) 拉刀的使用寿命	70
四、高速拉削用冷却润滑液	71
五、高速拉床的调整技术	73
(一) 卧式高速拉床的调整	73
(二) 拉刀的预调	78
六、典型零件的高速拉削工艺	81
(一) 压气机盘的拉削	81
(二) 涡轮盘的拉削	84
(三) 榫槽的检验	87
(四) 压气机叶片的拉削	91
(五) 涡轮叶片的拉削	97

绪 论

拉削是一种高效率的金属切削工艺，用于加工各种形状的内孔和外表面，加工外表面时，不仅可以加工平面，而且可以加工曲面。拉削还可以保证比较高的加工精度和光洁度，特别适用于大批量生产。因此，在国外各机械加工行业中，作为一种基础金属加工工艺，受到普遍重视。

对于现代航空发动机、汽轮机、汽车、机床、电机等制造工业的零件加工，拉削工艺正是由于其基本特点，所以采用极为普遍。例如现代航空发动机的压气机和涡轮，其轮盘与叶片往往采用燕尾形和枞树形榫齿的连接，无论是叶片的榫头或轮盘的榫槽，都是形状复杂，精度和光洁度的要求甚高，而且单台产品零件数量很多。对于这类特殊型面的机械加工，能够比较完满地达到各种要求，唯一可取的只能是拉削工艺。

五十年代以来，国内对于航空发动机压气机轮盘和涡轮盘的燕尾形和枞树形榫槽的拉削，一般都是在普通液压卧式内拉床上进行外拉削加工。它是在内拉床上装上一整套专门设计的底座、分度装置和转接夹具，使用3~12把柄式拉刀，经过多次的装刀、拉削、卸刀完成一个槽形的加工，然后，再经过分度并重复上述过程，几十次甚至上百次才能完成一个零件的加工程序。这样的拉削工艺方法有很多缺点：其一，拉削时振动大，零件的光洁度和精度不易得到满意的结果。产生振动的原因虽然与夹具和刀具等有关，但主要还在于液压内拉床本身的结构、刚性和精度。这种振动不仅影响零件质量，而且使拉刀刀齿的前、后角有效值发生变化，导致拉削时刀刃后角成为负值，拉削条件从而急剧恶化，拉刀寿命迅速下降。正是由于这些因素的影响，目前普遍采用的拉削速度还限于在7米/分以下。其二，操作工人的劳动强度大，工作条件恶劣。一个大型发动机的压气机盘或涡轮盘，其

榑槽往往在六、七十个以上，使用6~12把拉刀成型。工作时每台拉床至少需要四人操作（装拉刀一人，操纵机床、分度一人，卸拉刀一人，清除切屑一人），一个零件需装卸更换拉刀少则400次，多则800余次，一个工作班若按拉削2个轮盘计算，则装卸次数达上千次。每把拉刀的重量约10~20公斤。显而易见，劳动强度是很大的。况且在清除拉刀切屑时，用压缩空气吹和手工刷除切屑，冷却液油雾弥漫，拉刀屑末飞溅，工作条件恶劣。

繁重的体力劳动，恶劣的工作环境，较低的工作效率和产品质量上的问题，曾促使不少工厂努力寻求解决办法。先后曾在卧式内拉床上进行技术革新，实现了部分拉削半自动化，从而减轻了工人的体力劳动，提高了生产率。但由于设备本身结构的限制以及刀具等多方面的原因，仍然没有彻底解决。

随着航空和航天事业的迅速发展，许多新的难加工材料如不锈钢、耐热合金、钛合金和超高强度钢等使用日益广泛。这些材料的拉削加工，更给拉削工艺带来一系列需要研究和探讨的问题。国外各工业发达国家为此采取了多方面的措施。美国在研究改进刀具材料方面，经过多年探讨，成功地研制出了M40系列(M40~M42)高钴高钒超硬型优质高速钢，在拉削难加工材料中，使刀具耐用度提高了2~3倍。1956年又首先报导了关于高速拉削灰铸铁的研究报告。随后，欧洲和其他各国也陆续开始了高速拉削理论的研究和新型高速拉床的设计工作。1958年英国罗尔斯·罗伊斯公司为了提高发动机零件的表面质量和拉刀耐用度，经过试验成功地把高速拉削应用于康维(Conway)和达特(Dart)发动机不锈钢涡轮盘的枞树形榑槽加工，使拉削速度从粗拉3.5米/分，提高到15~20米/分，精拉从2米/分提高到30~35米/分。之后，高速拉削这项技术更引起了人们的注意，应用越来越广泛。美、英、法、苏、日、德等许多工业先进国家的钢件和铸件的拉削速度普遍超过了30米/分，有的甚至高达60~100米/分。

高速拉削的出现是拉削工艺发展上的一个重大突破，它打破了传统的概念，推动了拉床、拉刀、夹具和冷却液的发展，使拉

削工艺进入了一个新的发展阶段，不仅促进了拉床的改革，还相继出现了各种新型的高速拉床和高速拉刀，而且拉削机理也有了进一步的发展。

我国自1955年开始由长沙机床厂生产拉床以来，拉床品种不断扩大和发展，由卧式内拉床、立式内拉床和外拉床发展到生产各种连续拉床和专用拉床。拉削的工艺范围也逐渐扩大，由开始只能加工内孔键槽和各种形状的通孔，到六十年代已能加工各种中、小型零件的成型表面。1972年，济南第二机床厂试制成功一台高速侧拉床，在行程、速度、自动化程度等各方面，比原有的老式拉床大有改进。1977年该厂又生产出了我国第一代L 6510型卧式高速侧拉床，用于拉削航空发动机的涡轮盘和压气机盘、燃气轮机的涡轮盘以及柴油机增压盘等零件的榫槽，为填补我国拉床品种的空白，进一步提高拉削速度作出了贡献。

七十年代末期，在引进英国斯贝航空发动机制造专利的同时，我们引进了目前世界上最新一代的高速拉床、高精度的分度设备、新型拉刀和相应的润滑液等，使我们有可能完整地研究有关高速拉削新工艺的各个方面，有效地解决了老式拉削工艺的加工质量、生产效率、拉刀寿命和劳动强度等一系列问题。本书拟从生产实践的角度出发，就有关高速拉削的机理、设备、刀具和工艺等进行探讨。

一、高速拉削的机理

近年来，世界各工业先进国家普遍采用现代化的检测技术，对拉削的机理和实践进行了深入、全面而又系统的研究，并取得了较好的成果。就拉削速度而言，这些研究中包括了拉削速度与表面光洁度、拉刀寿命、切削温度、拉削力的关系，以及不同条件下，拉削速度对被加工零件表面质量的影响，等等。但是，对

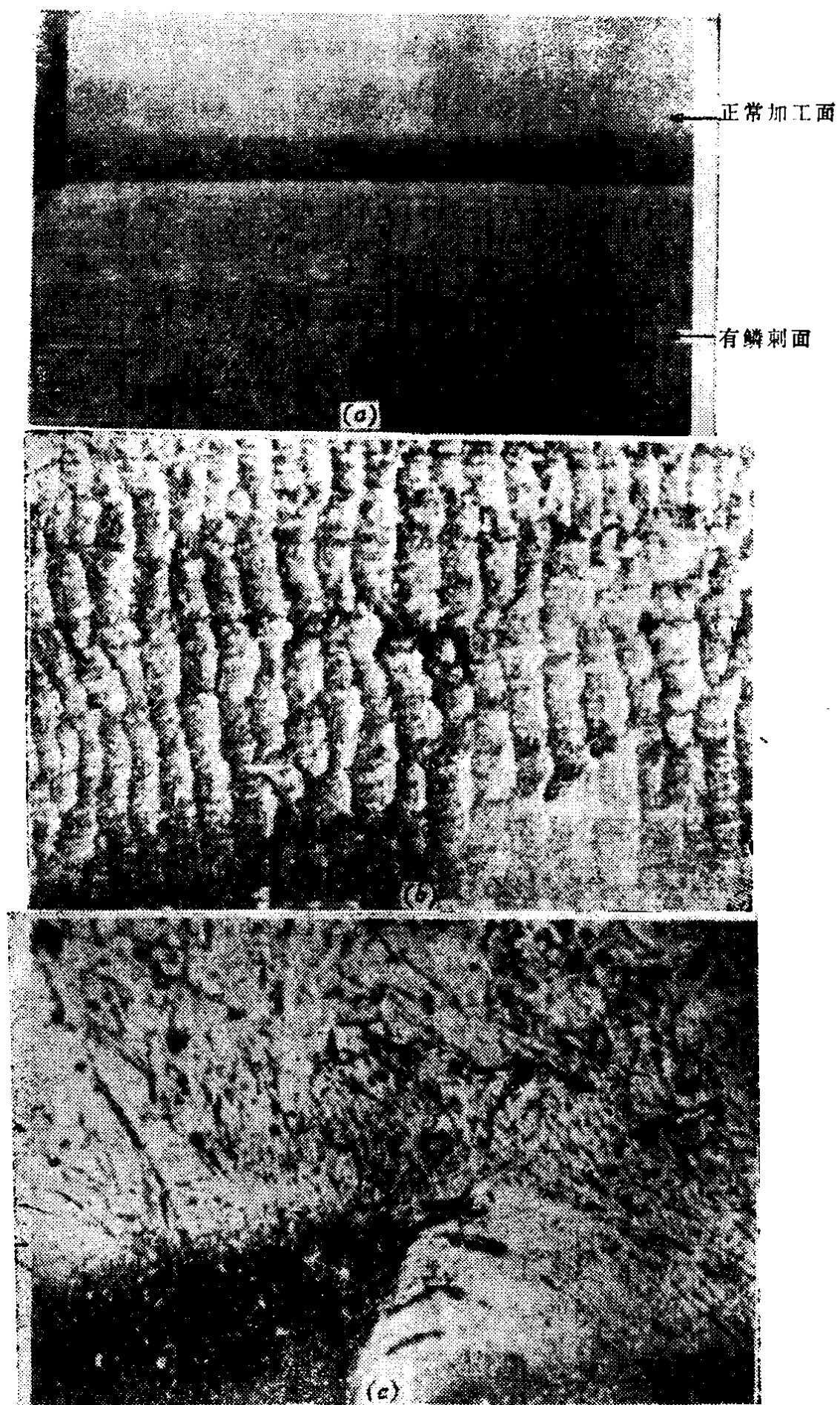


图2-1 鳞刺表面

(a) 鳞面状态; (b) 鳞面局部放大 $\times 10$; (c) 鳞面局部放大 $\times 500$ 。

于高速拉削的定义却有不同的看法。不少人认为，只有当拉削速度超过一个规定值，比如30米/分以上时，才算是高速拉削。

对此，我们有些看法，这需要先从前拉削加工时的表面质量谈起。

(一) 拉削时的表面鳞刺现象

1. 鳞刺的特征

当以低速拉削零件，特别是拉削不锈钢和镍基高温耐热合金时，常常在拉削表面产生鳞刺。这是一种锯齿痕状的不平度面，虽然拉刀切削刃留下的切削方向的痕迹已经难以分辨，但可以见到呈薄片状相互重叠的波纹形狭带，构成已加工表面的切削方向的粗糙度，它在表面上分布有一定的规律性，用手抚摸有如逆向触摸鱼鳞（见图2-1）。从图2-1(a)中可以看出，加工表面的初始阶段是没有鳞刺的，而在中段以后出现鳞面，越往后越严重，每两个鳞片间的距离有所变化。

图2-2是苏联拉削工作者研究X17H13M3T(Cr17Ni13Mo3Ti, 括号内为国产牌号，下同)钢的拉削鳞刺时，沿金属纤维方向测出的鳞刺的显微硬度。从图2-1(b)鳞刺的显微照片中可以看出，鳞刺的纤维组织到零件材料原始组织的过渡是相当平滑的，而其显微硬度的分布图2-2则表明，靠近鳞刺顶部的金属硬度值最大，由此往下，每一层纤维上的硬度依次降低，直到最下层时，与零件材料本身的硬度相等，这一硬化表层的厚度约为

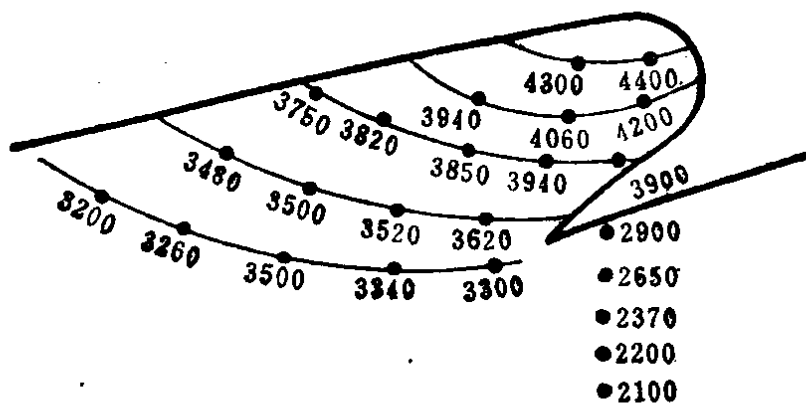


图2-2 X17H13M3T鳞刺剖面上的硬度分布

试验条件：前角 $\gamma = 20^\circ$ ；切屑厚度 $t = 0.5$ 毫米；拉削速度 $v = 1$ 米/分。

0.25~0.3毫米。分析同一试件时，还发现同一表面上相邻两个鳞片间的距离大小不一样，变化很大。总的趋势是在接近切削长度终点的那一端，鳞刺间距逐渐变大。

拉削表面的鳞刺现象严重地影响零件拉削表面的质量，光洁度低，冷作硬化层深，残余应力大，零件的抗疲劳强度和抗腐蚀能力大大下降。而且，由于鳞刺具有较大的硬度，及其特殊的几何形状，使得配合零件表面的磨损更加强烈。如果是紧配合的零件，还会影响配合精度，而且对于拉刀的磨损也有很大的影响。

2. 生成鳞刺的机理

拉削表面生成鳞刺现象的机理，有两种不同观点的解释。“刀瘤派”的论点认为鳞刺是由于拉削时产生刀瘤，刀瘤底部周期性破裂以及拉削排出带状切屑时，切屑带受滞区破裂的结果。鳞刺有一般的和临界的两种，一般鳞刺的形成过程是当切屑脱离工件时，在零件上周期性地与切削线成一个 ψ 角的表面（图2-3），所以，每一个鳞片的顶点总是比下一个鳞片的顶点高。另一方面，由于切屑分离和刀瘤底部的破裂，使得刀瘤底部逐渐变大，因而刀瘤底部挤入材料的阻力随之增大。这样到一定时候，刀瘤底部就沿切削线与刀瘤本体分离而留在被拉削过的零件表面上形成临

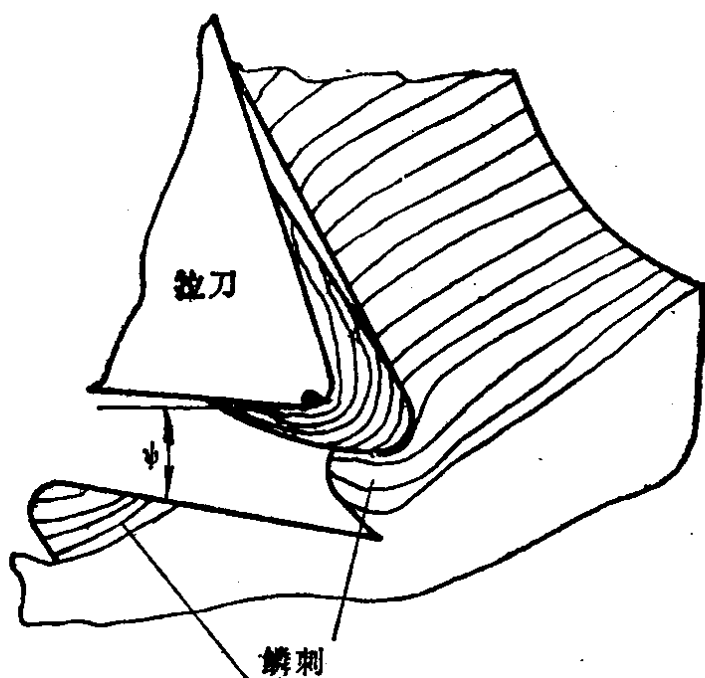


图2-3 在产生刀瘤情况下拉削时，鳞刺形成示意图

界鳞刺。两种鳞刺都不可分离地牢牢粘固在零件表面层上。当切屑深度越大、拉刀前角越小，就有可能在越低的拉削速度下出现鳞刺，一般鳞刺的间距随切屑厚度的增大和前角的减小而增大。

如果拉削时是挤裂粒状和链状的切屑，拉削表面会产生波纹。波纹是若干个鳞刺形成的不平度周期性重复出现的结果。这些鳞刺在拉削方向上的间距和微坑是逐渐增大的，而鳞刺是由于切屑受滞区破裂引起的，而且在拉削过程中鳞刺高度增大，这就促使后面每一个鳞刺增长。

试验证明，当切屑厚度一定、拉刀前角不变的条件下，在低速拉削时，切屑为粒状和链状，没有出现鳞刺现象。当拉削速度提高到 $3 \sim 5$ 米/分时，出现了鳞刺。若更进一步将拉削速度提高到 7.5 米/分以上，鳞刺则有所减少，到 10 米/分以上时，拉削表面不再出现鳞刺。

由于刀瘤和切屑受滞区只是切屑的补充变形的材料形成的，所以形成鳞刺的物质都不可能是零件材料，而主要是拉削时刀瘤片和切屑带 $\longleftrightarrow$ 撕裂 $\longleftrightarrow$ 零件表面而造成的。

另一个是“基体派”观点，他们认为鳞刺是零件材料基体组成的，其成份与零件基体的成份完全一致。鳞刺的形成是零件拉削表面由于切削力和切削热的作用，使表面层金属产生晶界滑移，晶粒错位，呈现一定深度的滑移带，而鳞刺正是从滑移带中拉起的缺陷。拉伸力是拉刀后面与零件加工面的弹性变形之间摩擦的结果。

拉削鳞刺的形成大致可分为四个阶段，见图2-4所示：

(1) 挤压阶段 在拉刀前刃面和刀尖的推挤下，切屑沿前刃面流出，与前刃面发生了强烈摩擦作用，并将前刃面上有润滑作用的氧化膜和吸附膜带走，致使摩擦系数增大，拉刀和切屑间的实际接触面积增大，使温度急剧升高。同时，由于拉刀与切屑间存在的巨大的压力，使得在前刃面上产生冷焊。一旦冷焊产生，切屑便停留在前刃面上。停留在前刃面上的切屑代替前刃面挤压，刀刃前方的金属受到压缩而变形，在一定范围内形成应力

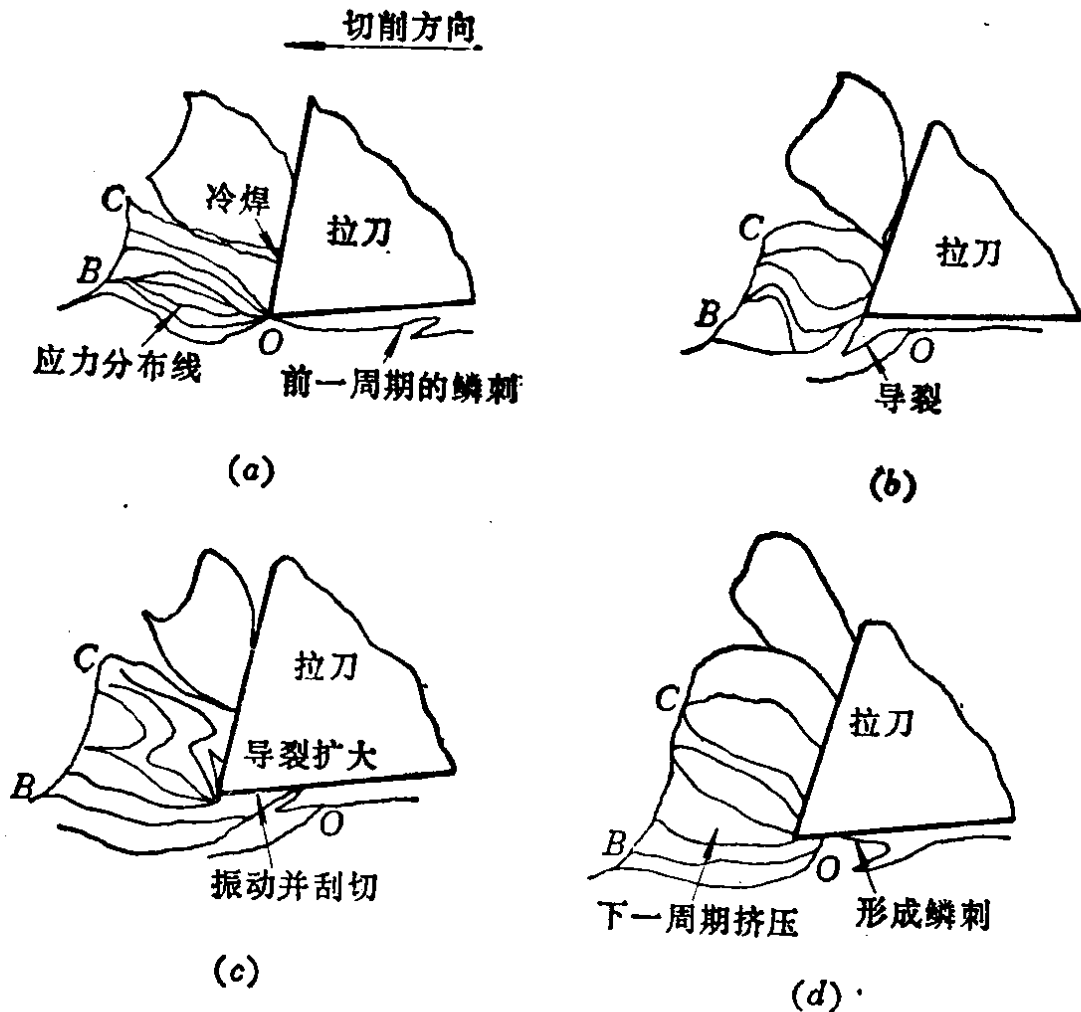


图2-4 鳞刺形成过程

(a) 挤压阶段; (b) 导裂阶段; (c) 层积刮切阶段; (d) 形成鳞刺阶段。

变形区 OBC。

(2) 导裂阶段 拉刀继续前进时, 金属的硬度逐渐增加, 脆性增大, 而可塑性降低, 当剪切应力超过一定数值, 刀刃前方的金属失掉可塑性, 在切屑与零件之间导致产生裂口。

(3) 层积刮切阶段 当拉刀继续切削, 由于金属滑移面的面积逐渐增大, 而切削厚度增大, 使切削抗力增大, 导致扩大撕开, 层积金属便被刀刃刮切造成不稳定切削。

(4) 形成鳞刺阶段 当层积金属被刮切时, 由于零件材料的弹性变形与拉刀的后刀面摩擦而产生拉伸应力, 使已加工表面上形成尾部向上卷起的鳞刺, 而拉刀前刃又开始了另一个鳞刺形成的挤压阶段。

这种由于刀具对金属被切削表层挤压、导裂、层积和刮切的

反复交替而形成的鳞刺与材料的冷作硬化趋势和拉削力的大小有关。不锈钢和高温合金等由于其剪切应力较一般钢材拉削时大得多，所以鳞面的形成剧烈，鳞刺也特别明显。

“基体派”还认为减少鳞面出现的有效途径是增大切割作用，减少刀具的推挤作用。

3. 消除鳞刺的方法

我们认为“基体派”的观点更接近于客观实际，但“刀瘤派”的论述也有若干可取之处。两派关于鳞刺生成的机理虽有不同的看法，但对于消除鳞刺的方法则是一致的，认为可以从多方面着手，但不外乎是：

(1) 选用刚性好、拉削力大、精度高、工作平稳，无爬行的拉床。

(2) 选用优质的高速钢，如欧美的 M42、日本的 YXM2 作为拉刀材料，或选用硬质合金镶片拉刀等。

(3) 改变拉刀的几何参数。如增大前角，以加大切割作用；增大后角，以减少与零件之间的摩擦；增大齿升量，以超越冷作硬化层；增大齿距，以加大容屑的空间；以及提高拉刀的制造精度，等等。所有这些目的是使刀具更锐利，以降低拉削应力。

(4) 使用良好的润滑油，增加冷却剂量，以减少拉刀和零件之间的摩擦。

上述这些措施都能取得一定的效果，如首都机械厂在拉削不锈钢盘时，由于光度低 ($\nabla 4$) 出现鳞面，将原有的拉刀几何参数，由三“小”，即小前角 ($10^\circ \sim 15^\circ$)、小齿升 ($0.025 \sim 0.03$ 毫米)、小齿距 ($3 \sim 5$ 毫米)，改为三“大”，即大前角 (22°)、大齿升 (0.05 毫米)、大齿距 (7 毫米)，拉刀齿数减少 $1/2 \sim 1/3$ ，长度缩短 $1/5 \sim 1/10$ ，结果拉削光度提高了二到三级，刀具耐用度也提高了三倍。

应该指出的是，无论是“刀瘤派”或“基体派”，通过试验，都承认要解决鳞刺现象，提高拉削表面质量的最有效途径，莫过于提高拉削速度。

(二) 高速拉削的试验

五十年代以前,一直认为在相同的加工条件下,低的拉削速度可以得到更好的表面质量,甚至有人主张,只要生产率许可,可以尽量地降低拉削速度。但是,近年来试验的结果证明了以下几点:

1. 随着拉削速度的提高,工件表面质量不仅不会降低,反而会使工件的表面光洁度得到改善,拉刀寿命也随之增长。

(1) 西安红旗机械厂曾对斯贝发动机高压 第九级转子叶片进行了试验,明显看出,拉削速度为 5 米/分时,叶片榫头表面有“鳞刺”状波纹。当拉削速度提高到 30 米/分时,“鳞刺”现象消失,光洁度显著好转,见图2-5所示。

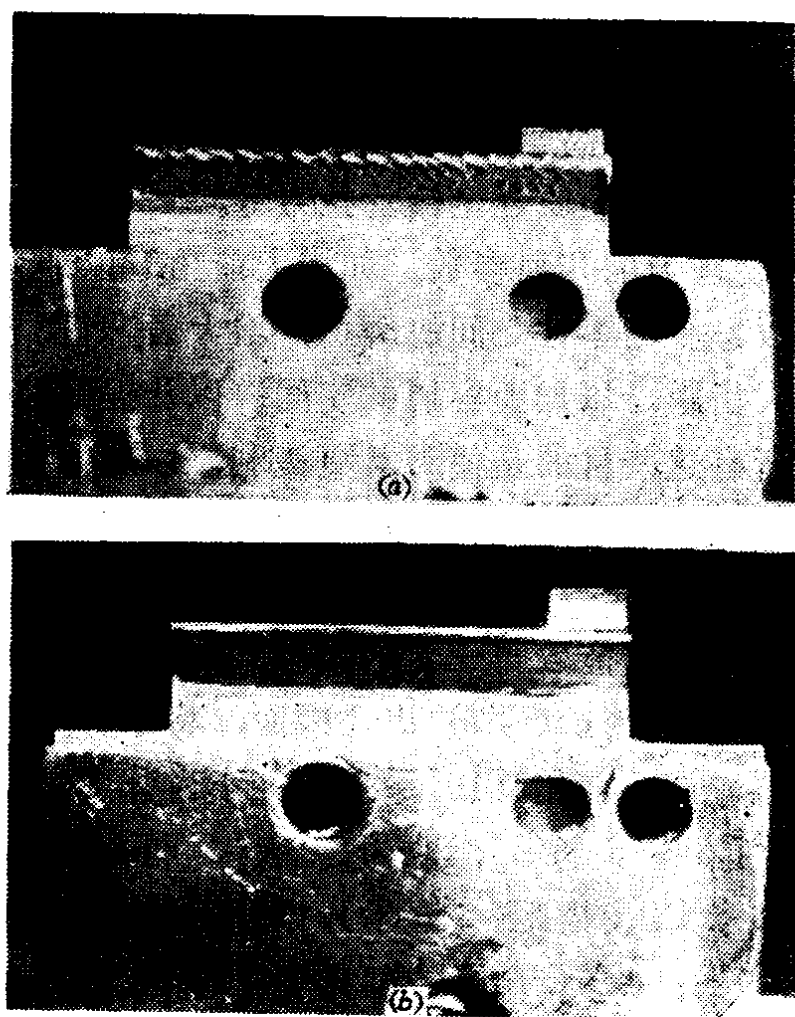


图2-5 叶片榫头拉削试验

(a) 拉削速度为 5 米/分时的鳞刺状波纹; (b) 拉削速度为 30 米/分时的光滑表面。

试验条件: 零件材料 S/SAV(耐蠕变铁素体不锈钢)HB = 286~321;

拉刀 材料M42, HRC = 66~67, 前角 $\gamma = 12^\circ$, 后角 $\alpha = 3^\circ$, 齿升

量 $a = 0.03$ 毫米; 机床 XS30-72 高速立式拉床; 冷却液自配(成分见本书72页)

(2) 英国罗尔斯·罗伊斯公司曾对不锈钢压气机第4级转子叶片进行从低速到高速的拉削试验，见图2-6所示。

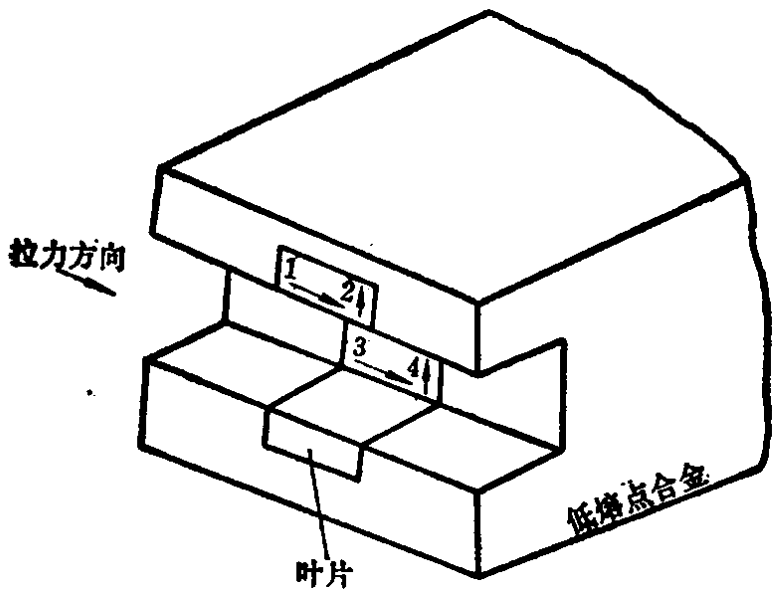


图2-6 高速拉削试验件

图2-6中所示试验件的试验条件如下：机床 拉普安特公司生产的SRHE型高速卧式拉床；拉刀 材料M42，前角 $\gamma = 14^\circ$ ，后角 $\alpha = 3^\circ$ ，齿升量 $a = 0.076$ 毫米。零件材料 不锈钢；冷却液 见本书72页

试验结果，见表 2-1 和图 2-7。

表2-1 拉削速度与表面光度关系

拉 削 速 度 (米/分)	表 面 光 度 (微米)							
	叶 片 1				叶 片 2			
	1	2	3	4	1	2	3	4
4.5	1.75	1.125	0.6	0.7	1.15	1.625	0.4	0.8
12	0.5	1.25	0.325	0.75	0.9	1.25	0.225	0.6
18	0.225	1.2	0.25	0.525	0.675	0.675	0.3	0.75
24	0.1	0.325	0.1	0.45	0.1	0.475	0.125	0.4
30	0.1	0.3	0.075	0.45	0.1	0.45	0.1	0.425
36	0.075	0.3	0.1	0.45	0.075	0.4	0.1	0.475

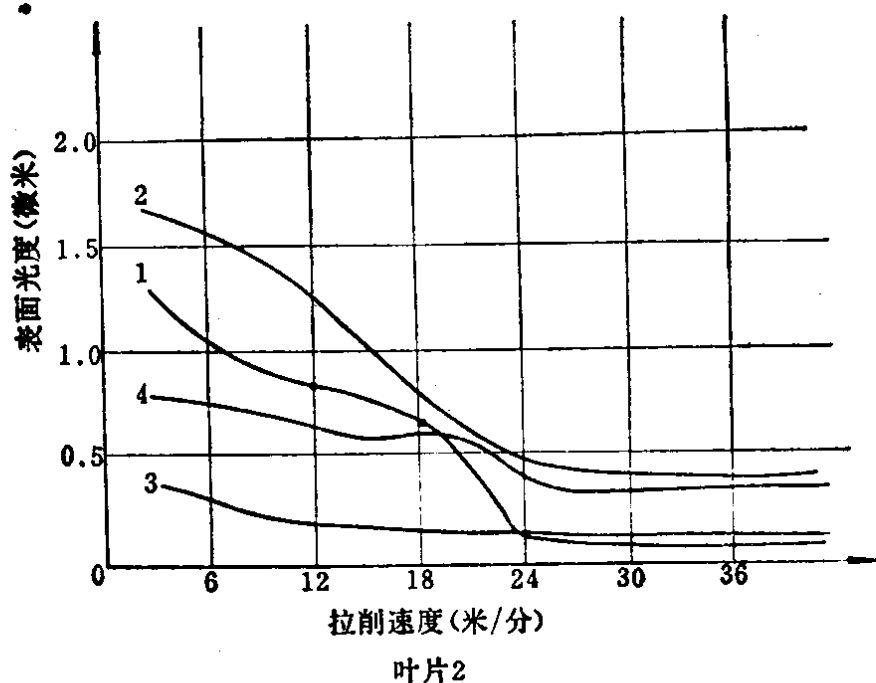
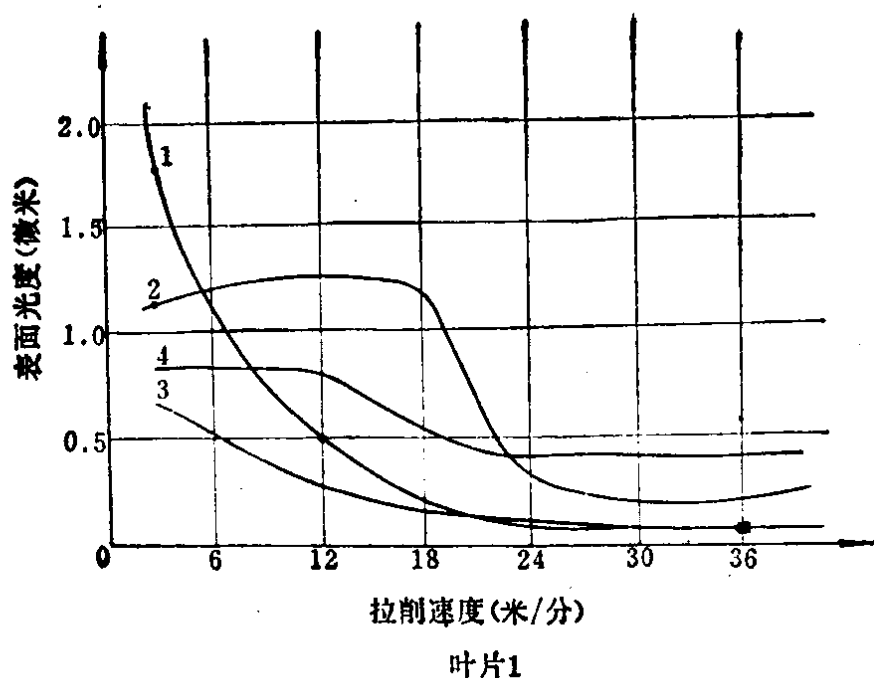


图2-7 拉削速度和表面光度关系

从坐标图上可以看出，随着拉削速度的提高，零件表面光度在不断地改善，但当拉削速度达到或超过 24 米/分以后，光洁度提高的趋势逐渐稳定，没有更大的变化。因此，一般对不锈钢的拉削，为了提高表面质量，提高刀具寿命，应采用 14~30 米/分的拉削速度。

(3) 苏联学者曾对 BT8 (Tc8), BT9 (Tc9) 和 OT4 (Tc2)