

关于金属切削过程中刃区物的 的 受 力 分 析

高 希 正 刘 德 忠

(机械制造教研室)

摘 要

本文第一次提出了刃区物(Material on the edge section)的概念。认为,前刀面流变层及积屑层、后刀面流变层及积屑层、副屑、积屑瘤、鳞刺等均是刃区物的衍生物。文中对刃区物的受力状态进行了分析,提出了刃区物受力状态模型,并对各种衍生物的产生条件进行了分析。

The Stress Analysis of the Material on the Edge Section in the process of Metal Cutting

gao Xi—zheng Liu de—zhong

Abstract

In this paper, the concept of material on the edge section is put forward for the first time. It is believed that the flow layer and built-up layer on the face and flank, the additional chip, the built-up edge and the scale are all derivatives from the material on the edge section. Stress state of the material on the edge section is analysed and a stress model is given. The conditions which the various derivatives result from are also studied in this paper.

本文于1982年2月10日收到。

一 概 述

众所周知，刀具前刀面与后刀面相交出的切削刃，严格的说，并不是一条线，而是一个区域，称为刃区面。经过仔细刃磨的前刀面与后刀面交出的切削刃通常是钝圆半径为数微米至几十微米的小圆弧面，一般称为锋刃。锋刃情况通常是在刃磨时自然获得的。为了某种特殊需要，有时把刃区面做成较大的圆弧面，称为弧面刃区面；或做成小平面，称为棱面刃区面（图1）。棱面刃区面中，当 $r_f=r_0$ 时（即 $b_f=0$ 时）即为锋刃情况。所以可以说，锋刃是棱面刃区面的一种特殊形式。按一般概念， $r_f > -45^\circ$ 时，其棱面属于前刀面， $r_f < -45^\circ$ 时则属于后刀面。但是，将棱面分属前或后刀面的正确方法应是如下文所述的，决定于刃区物的主要部分流动方向。

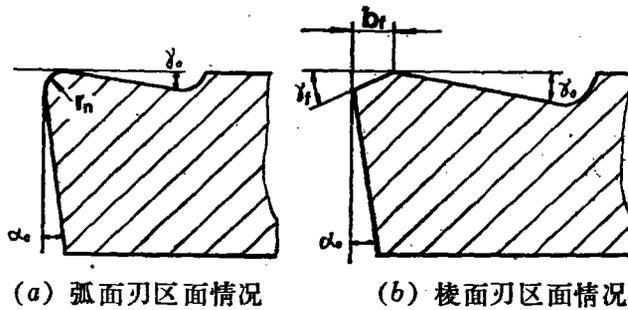


图1 刃区面的主要形式

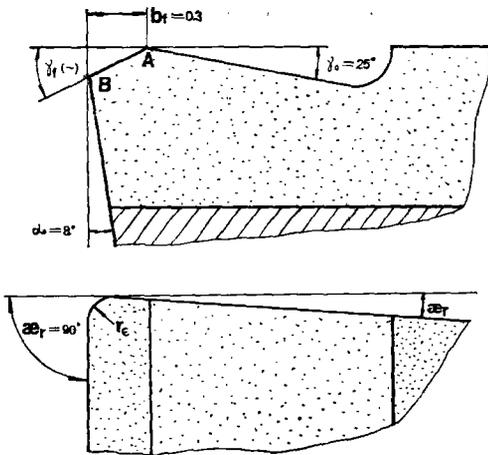


图2 实验用棱面刃区面车刀几何参数

一般就切削塑性金属而言，切屑是切削层受到刀具前刀面的推挤作用在第一变形区产生剪切滑移，继而又经前刀面的挤压摩擦而产生的。刃区面作为通常的前后刀面的过渡表面，它当然也对切削层进行推挤和摩擦，因此也应有与该刃区面对应的一部分‘切屑’产生。这部分‘切屑’在切削过程中以多种形态出现，通称为刃区物的衍生物（Derivatives from the material on the edge section）。刃区物（material on the edge section）则是指这部分‘切屑’未流出前仍置于刃区面上时的状态（图3）、（图5(a)）。

刃区物是本文提出的一个重要概念。本文作者认为，通过刃区物的衍生物产生规律的分析，可以对切屑形成过程中出现的许多重要现象，特别是它们的内在的联系给予合理的解释。直到目前为止，各种关于切削机理的文献中所论及的积屑瘤、积屑层、流变层、副屑及鳞刺等现象，均可以通过刃区物进行概括。刃区物是解释它们的内在联系，掌握它们之间变化规律的媒介。本文在初步的实验结果的基础上，对刃区物的受力状态及与各种衍生物的关系作了初步的阐述，并对这些衍生物的产生条

件作了初步的分析。不难断言，明了和掌握刃区物的受力状态及刃区物转变成各种衍生物的条件，人为的控制这些衍生物的种类及大小，对提高实际切削加工中的已加工表面质量及刀具耐用度等重要问题是具有实际意义的。

二 刃区物受力状态的分析

当切削厚度 a 相对刃区面的尺寸是足够小时，此时棱面刃区面就变成具有较大负前角的前刀面。该前刀面对切削层进行推挤，以很小的剪切角使工件材料发生剪切滑移，切削层（即为下述的切削厚度较大情况下形成刃区物的部分）流经该刃区面形成切屑，沿图 3(a) 的 X 方向流出。这种情况与产生通常切屑的场合没有什么区别。然而，当切削厚度 a 足够大（通常 $a_c > b_f$ ）时，与该棱面刃区面对应的上述切屑，即刃区物就不一定再能沿刃区面的 X 方向流出。此时刃区物处于很复杂的受力状态。

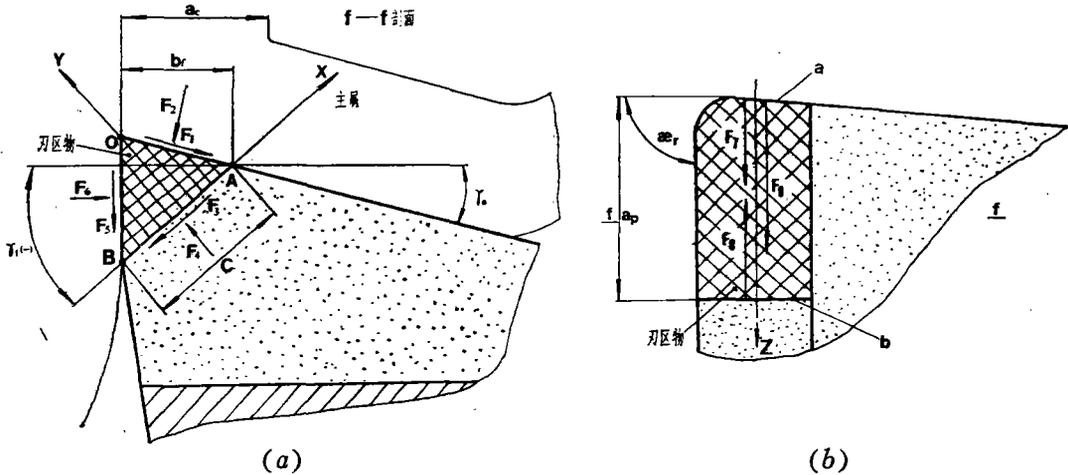


图 3 刃区物受力状态模型

这种情况下的刃区物由于位于切削层的底部，因而它还受到顶部切削层的剪切及挤压，而通常的切削层其上表面是自由表面。由于此时刃区物近似的承受到三向压应力，所以具有很高的抵抗变形而保持自己的形状的能力。因此，在某些条件下，它甚至可以代替刀具进行切削。至于这部分金属由于强烈的塑性变形而产生的显著的加工硬化，只能在某一速度区以下才能得以体现。在这一速度区以上，完全有可能被由于处于高温状态而产生的‘软化’所抵消。如果把刃区物假设为一刚体，则在切削厚度较大的情况下，刃区物的受力状态可简化为几种模型，图 3 所示是其中一种。

先讨论图 3(a) 所示的 $f-f$ 剖面中的受力情况。 F_1 及 F_2 为切削层的上面部分对刃区物的剪切力及正压力， F_3 及 F_4 为刃区面对刃区物的摩擦力及正压力（ F_3 通常主要表现为内摩擦力，其方向与刃区物的运动方向相反）， F_5 及 F_6 为工件母体对刃区物的剪切力及正压力。在切削刃方向上的受力状态如图 (b) 所示， F_7 为刀具副刃产生切屑时所形成的对刃区物沿切削刃方向的推力， F_8 为刃区面对刃区物的摩擦力与切削层及工件母体对刃区物在 Z 方向上的剪切力的合力，它是阻碍刃区物沿切削刃方向流出的力， F_9 则是由于刃区物的

a 侧处于平面应变状态而 b 侧处于平面应力状态因而造成的应力不平衡所致。它是促使刃区物沿切削刃方向（即 Z 方向）产生运动的力。

三 刃区物的几种衍生物产生条件的分析

刃区物的衍生物包括：副屑、积屑瘤、前刀面流变层及积屑层、后刀面流变层及积屑层（有时表现为鳞刺的形式）等。

1. 关于副屑产生条件的分析

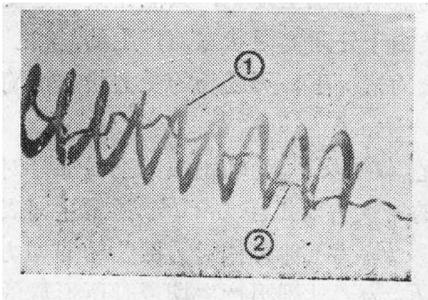
所谓副屑是指刃区物独立于流经前刀面的切屑（主屑）沿刃区面自行流出形成的切屑（图 4）。产生稳定副屑时的刃区物金相照片见图 5(a)。副屑是金属切削过程中的重要现象之一，它对切削温度、切削力，尤其是对刀具的磨损及表面加工质量有着重要的影响，这一点已受到金属切削界的重视。

从图 3(a)、(b) 可直接看出，产生稳定的副屑的条件应为

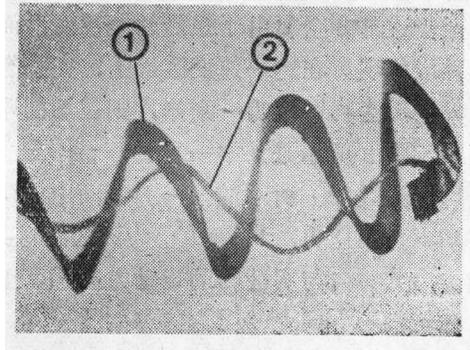
$$\Sigma F_x \approx 0 \quad (1)$$

$$\Sigma F_z > 0 \quad (2)$$

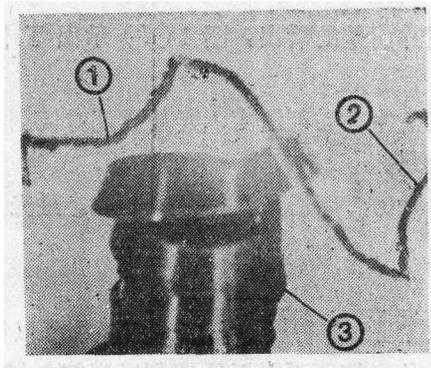
为满足式 (1)，不使刃区物越过 A 点，应尽量增大 r_0 角，而且应使 r_f 的负值保持在某一范围内，从实验知， $r_f = -30^\circ$ 左右为宜。从弹塑性理论知 $F_0 = A \cdot \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}$ ，其中 A 为刃区物横截面积（即为图示的 $\triangle AOB$ 面积）。很明显，切削厚度 a_c 越大，作用在 OA 、 OB 、 AB 各面上的法向力就越大，因此 F_0 就越大，这就更有利于满足 (2) 式。此外，使 a_c 相对 b_f 足够大，也由于能使切削层的上面部分对刃区物的正压力 F_s 足够大，因而有利于满足式 (1)。减小切削深度 a_p ，意味着位于切削层深处的刃区物沿切削刃方向（即 Z 方向）流出的路程越短，因此 F_0 就越小，有利于满足式 (2)，使刃区物作为副屑流出更容易。当增大主偏角 α ，使之接近 90° ，并使副偏角为很小值时， F_r 接近为最大值，且也因能使刃区物流出的路程最短而使 F_0 减小，这些当然有利于满足式 (2)。此外，由于 b 侧处于平面应力状态，因此在 Z 方向上产生有金属的流动，这种流动也是刃区物沿切削刃方向产生运动的组成部分。在只有主刃参加切削的自由切削的场合下（此时上述的 F_r 及 F_0 均为零），上述的金属流动就是唯一的能使刃区物沿切削刃方向呈现流动状态的因素。因此，刃区物沿切削刃方向的流



①主屑 ②副屑
(a) $\alpha_p = 3, (\times 2)$

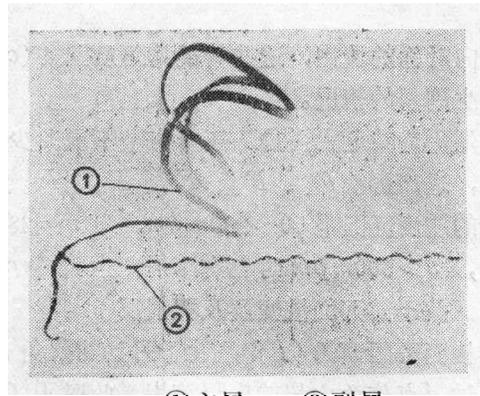


①主屑 ②副屑
(b) $\alpha_p = 2, (\times 1)$



①副屑 ②副屑 ③主屑

(c) 自由切削场合下两个方向产生副屑的情况



①主屑 ②副屑

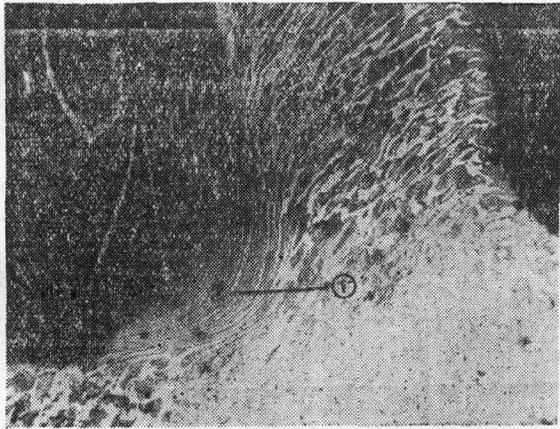
(d) 倒切屑切削场合下产生副屑的情况

$b_f=0.15, a_p=0.3, f=1.21mm/pr$

图4 副屑的外形照片

$r_f=-30^\circ, r_o=30^\circ, v=100m/pm, YT15, 45号钢, 干切削$

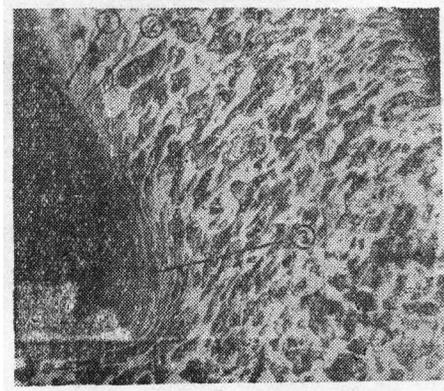
除 (d) 外 $b_f=0.3, f=0.4mm/pr$



①刃区物

(a) 有稳定的副屑产生, 刃区物基本上不流向切屑底部及加工表面。

$r_f=-30^\circ (\times 200)$



①前刀面积屑层 ②前刀面流变层

③刃区物

(b) 刃区物明显流向切屑底部 (在切屑底部有明显的流变层及积屑层)

$r_f=-10^\circ (\times 150)$

图5 用爆炸落刀的方法取得的切屑根部金相照片

$r_o=30^\circ, b_f=0.2, a_p=1, v=69m/pm, f=0.3mm/pr$

YT15, 45号钢, 干切削

动是很不流畅的, 与有副刃参加切削的非自由切削时产生副屑的情况 (图4(a)、(b)) 相比, 显出有些扭皱堆积的样子, 而且由于此时刀具的副刃不参加切削, 所以副屑沿 Z 轴的正及负

两个方向对称的流出，这些情况均可从图 4(c) 的照片清楚的看出。图 4(d) 示出了倒切屑时产生副屑的情况。

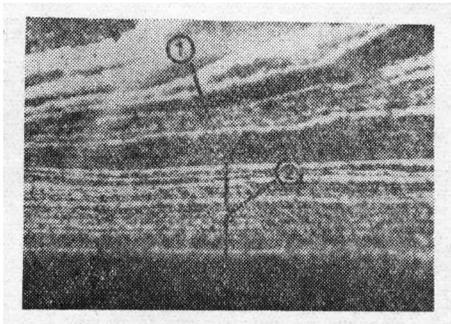
此外，为满足式 (1)，还有一个不可缺少的速度条件。切削速度主要是通过对切削温度的影响，进而影响 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 、 F_5 、 F_6 及 F_8 。从不太充分的实验知，最容易产生副屑的速度范围是 $50 \sim 200 \text{ mpm}$ ，当 $v = 280 \text{ mpm}$ 时仍有副屑产生（见表 1）。星光一先生认为， $v > 500 \text{ mpm}$ 时也有副屑产生。

2. 关于前刀面流变层及积屑层

当棱面刃区面的 r_f 角趋近于刀具的前角 r_0 （即趋近于锋刃状态）时，刃区物可以很容易的越过 A 点作为主屑的底层流出，此时刃区物即为位于切削刃附近的切削层底部金属，它正是流经前刀面的前刀面流变层（Flow layer on the face）的前身。流变层与切屑的其它的部分并没有明显的界线，它的各质点的流线相对前刀面呈连续的倾斜，该流变层的底部的流线近似平行于前刀面，上部则近似平行于剪切面（第二变形区的终滑移面）。当然，只是由于前刀面的摩擦也可以产生流变层。应该说，流变层并不是刃区物的典型衍生物，而是一种特殊形式。在大多数情况下，特别是在 r_f 为某一范围的负值情况下（例如为 -10° ），刃区物越过 A 点并经第二前刀面的摩擦也作为切屑的底层以前刀面积屑层（Built-up layer on the face）的形式出现，而在该积屑层相邻的上部则存在有上述的流变层（图 5(b)，图 6(a)）。可以看出，前刀面积屑层是一层纤维化方向几乎完全平行于刀具前刀面的切屑的最底层金属。不难想像，当这层金属与前刀面的摩擦力足够大时，便会停留在前刀面上，也会形成如下所述的积屑瘤。当然，在 $b_f = 0$ 的锋刃状态下，在流变层的底部也会有积屑层产生。从图(b)、(c) 可清楚的看到，位于切屑侧面上的与切屑底层的积屑层互成一体的间断凸起物。这些凸起物是由于刃区物在 Z 方向上刚开始流动时即被主屑越过 A 点带走产生的，它们之中有的已形成类似带状副屑的形状（图 6(d)）。图 6(b) 示出的是刃区物在 Z 方向上流动形成凸起物时的切屑横截面的金相照片。刃区物的主要部分越过 A 点作为切屑的底层流出的条件是：

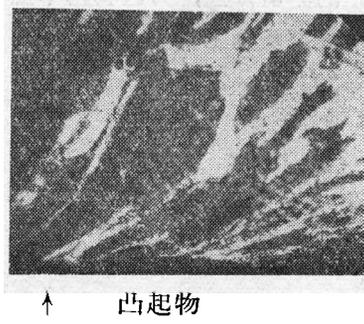
$$\sum F_x > 0 \quad (3)$$

$$\sum F_z = 0 \quad (4)$$



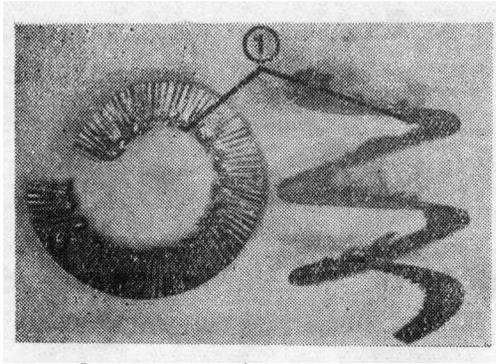
①前刀面流变层 ②前刀面积屑层

(a) 切屑的纵向截面金相照片 ($\times 400$)

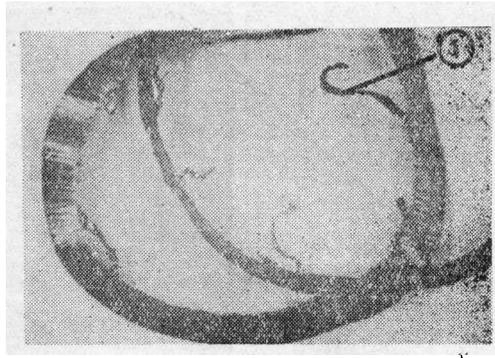


↑ 凸起物
刃区物

(b) 切屑的横向截面金相照片 ($\times 400$)



①刃区物凸起物
(c) 切屑外形 (× 2)



①断续流出的刃区物凸起物
(d) 切屑外形 (× 2)

图 6 刃区物的主要部分越过 A 点作为切屑底层流出时产生切屑的情况

$r_f = -15^\circ$, 其余与图 4 相同。

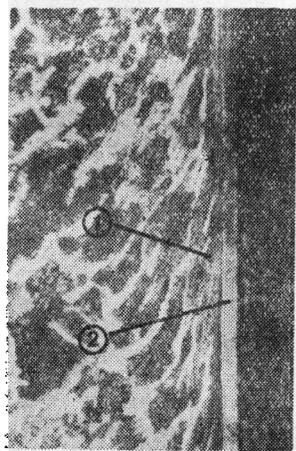
3. 关于由刃区物生成积屑瘤的条件分析

从前面的分析不难知道, 当位于刃区面上的刃区物既不满足 X 方向又不满足 Z 方向的运动条件, 而且本身又已被充分的加工硬化 (加工硬化程度超过因温度等原因引起的‘软化’) 时, 该刃区物即成为积屑瘤 (Built-up edge)。由刃区物在刃面上形成积屑瘤的条件是:

$$\Sigma F_x = 0 \quad (5)$$

$$\Sigma F_z = 0 \quad (6)$$

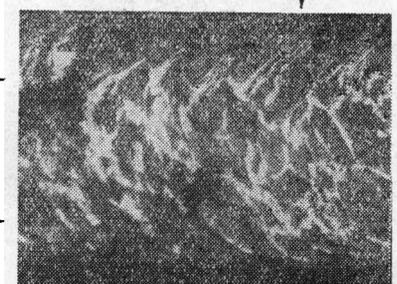
当然, 前述的由刃区物越过 A 点形成的积屑层而停留在前刀面上构成的积屑瘤也是一种积屑瘤的主要形式, 通常所说的积屑瘤多属此种形式。



①后刀面流变层 ②后刀面积屑层

(a) 加工表面的切削速度方向上的截面的金相照片 (× 100)

前次切削时形成的后刀面积屑层



(b) 切屑的纵向截面金相照片 (× 120)

图 7 刃区物的主要部分越过 B 点残留在加工表面上的情况

$r_f = -60^\circ$, 其余与图 4 相同



图 8 有积屑瘤时产生鳞刺(后刀面积屑层)的情况 ($\times 400$)
 $r_f = r_0 = 0^\circ$, $v = 20 \text{ mpm}$, 自由切削, 高速钢刀具,
 45 号钢, 干切削, $f = 0.08 \text{ mm pr.}$

4. 后刀面流变层及积屑层

与前刀面情况同样, 在已加工表面上也存在有后刀面流变层 (Flow layer on the flank) 及后刀面积屑层 (Built-up layer on the flank), 见图 7。在锋刃情况下, 后刀面流变层及积屑层也可以只是由于后刀面的摩擦而产生。在通常情况下, 特别是在 r_f 具有较大负值 (例如 $r_f = -60^\circ$) 情况下, 后刀面积屑层主要是由于刃区物越过 B 点并经后刀面的摩擦在加工表面上形成。后刀面积屑层的纤维组织几乎完全平行于加工表面, 这部分金属材料越过 B 点且又经过后刀面的进一步摩擦挤压, 因而发生巨大的塑性变形, 常使加工表面上的这一最外层金属产生很大的加工硬化及残留拉应力, 甚至使表面产生有裂纹。从图 7(b) 可明显的看出, 前次切削时所形成的后刀面积屑层, 在本次切削时作为切屑的上层发生断裂的情况, 此时与其相邻的流变层并没有发生断裂, 流变层的流线仍呈连续的状态。从该图还可以看出, 由于刃区物的主要部分已越过 B 点而残留在加工表面上, 所以在切屑的底层并没有明显的积屑层及流变层存在。从图 3 可知, 刃区物的主要部分流向加工表面的条件是:

$$\Sigma F_x < 0 \quad (7)$$

$$\Sigma F_z = 0 \quad (8)$$

在一些文献中所叙及的鳞刺, 实际上是后刀面积屑层在低速下呈现出的一种形式, 是由于刃区物断续的越过 B 点并经后刀面的摩擦所形成。鳞刺通常发生在更低的速度区。这主要是因为一方面要满足向 X 的负方向的运动条件, 另一方面还要具有深入到工件母体内的较大范围的刃区物尺寸的缘故。此时, 图 3(a) 所示的刃区物简化模型中的 BO 线已偏离至工件母体一侧, 即 O 点深入到工件母体内部。产生积屑瘤与否均可能有鳞刺生成, 从图 8 可清楚的看到有积屑瘤时生成鳞刺的情况。此时仿佛积屑瘤表面已变成刃区面, 只有产生鳞刺的那一部分是刃区物。鳞刺会严重的恶化加工表面质量, 是低速精密加工中应极力避免的现象。关于工件加工表面及切屑底面上所镶嵌的积屑瘤碎片, 也可以说是刃区物的衍生物的一种特殊的形式。

以上叙述了刃区物的各种衍生物, 其中包括副屑、积屑瘤、前刀面积屑层、后刀面积屑

层以及积屑瘤碎片等，切削加工中产生的这些衍生物有时是以一种形式为主，但经常是几种衍生物同时发生，呈现出错综复杂的状况。

四 实 验 结 果 举 例

表1 实验结果实验条件

编号	棱面前角 r_f (度)	切削速度 v (m/min)	进给量 f (mm/r)	切削深度 a_p (mm)	实验结果	变化规律
1	-10°	100	0.4	3	刃区物的主要部分越过刀具的A点，作为位于切屑底部的前刀面积屑层在前刀面上流出(图5(b)及图6(a))。	变化 r_f ，当 r_f 具有较小负值(例如-10°)时，有利于刃区物越过A点作为前刀面积屑层(及流变层)流出。当具有较大负值(例如-60°)时，有利于越过B点作为后刀面积屑层(及流变层)残留在已加工表面上。当 r_f 在某一范围(例如-30°左右)时，有利于产生副屑。
2	-60°				刃区物的主要部分越过刀具的B点，作为后刀面积屑层残留在工件的已加工表面上(图7)。	
3					刃区物形成稳定的副屑，沿切削刃方向在棱面刃区面上流出，呈弯扭形状(图4(a))。	
4			0.2		刃区物的一部分形成不稳定的副屑，被主屑的底层沿前刀面带出，副屑形状与图6(d)相似。	变化 f ，增大 f 使刃区物不易越过A点，且有利于增加沿切削刃方向(Z向)流出的力，因此有利于产生副屑。
5	-30°		0.15		不产生副屑，与实验1相似。	
6			0.3	2	产生稳定的平直副屑(图4(b))。	变化 a_p ，减小 a_p ，有利于减小刃区物沿切削刃方向排出时的阻力，因此有利于副屑平直流畅的流出。
7					基本与实验3相同，产生弯扭状副屑(图4(a))。	
8					有副屑产生	
9			15		无副屑，有鳞刺产生	变化 v ，在较宽的切削速度范围内均稳定的产生副屑(本实验结果还很不完善，需进一步做实验研究)

实验条件 { 刀具: YT15, $r_0=30^\circ$, $\alpha_r=90^\circ$, $\alpha_0=8^\circ$, $b_f=0.3\text{mm}$, $r_e=0.5\text{mm}$
 工件: 45号钢 机床: C620-1车床 切削液: 干切削

本文所引用的有关实验结果及实验条件均列于表1。实验用车刀的几何参数如图2所示。

参 考 文 献

- [1] 华南工学院、甘肃工业大学, 金属切削原理及刀具设计(上册), 上海科技出版社, 1979。
- [2] 白井英治, 切削研削加工学(上册), 共立出版株式会社, 1971。
- [3] 星光一, 星铁太郎, 金属切削技术, 1969。
- [4] W. B. Palmer, R. C. K. Yeo, Metal flow near the tool point during orthogonal cutting with a blunt tool .