

中国机械工程学会机械加工学会

第三届年会论文集

(二)

中国机械工程学会机械加工学会编审委员会编
《机床》杂志编辑部出版

TG5-53

1001



30155992



钛合金车削过程切屑形成的实验研究

EXPERIMENTAL RESEARCH ON MECHANISM OF CHIP FORMATION IN TURNING TITANIUM ALLOYS

南京航空学院

潘良贤

吴殿宗

刘肇发

陈章朝

Nanking Aeronautical
Institute

Pan Lianhsien Wu Dianzhong
Lin Chaufa Zhen Zhangchao

〔内容提要〕运用爆炸型快速落刀装置“冻结”切削技术，以及切削力和显微硬度的测定，在空气和氩气中切削的对比等方法，对钛合金车削过程切屑形成的机理及其难加工的主要原因进行了探讨。

试验表明：钛合金的变形较小，加工硬化不严重，得到的是挤裂型片状切屑，其切屑形成机理与45钢带状切屑有所不同。并进而指出其不同的主要原因是钛合金强烈的化学活性。这种化学活性是钛合金难加工的主要原因。因此深入研究它的机理，采取适当的措施加以抑制，是改善钛合金切削加工性的一个重要方面。

此外，本文还就切削速度，进给量和刀具前角对钛合金车削过程中变形的影响，进行了实验分析。

ABSTRACT: In this paper the "freeze" cutting technique by explosive quick-stop device is introduced.

By measuring the cutting force and the microhardness of chips and comparing the experimental results of cutting both in argon and in air, the chip forma-

tion mechanism in turning titanium alloys and the main reason why for the difficulty in cutting they are difficult to cut are explained.

According to the experimental results in turning titanium alloys and carbon steel, which have been compared and analyzed in different respects, it is shown that the deformation of chips and work hardening of titanium alloys are less than those of carbon steel under the same experimental conditions. In turning titanium alloys the shear type chip is formed, while in turning carbon steel we get continuous chips. The mechanism of chip formation are different under the same cutting conditions. The paper also shows that the main reason for different mechanisms is due to the drastic chemical affinity of titanium alloys.

The authors believe that an intensive research on the mechanism of the chemical affinity and on the means to inhibit the affinity as much as possible is of great importance to the improvement of machinability of titanium alloys.

The paper also discusses the effects of the cutting speed, feed and tool rake angle on the process of chip deformation in turning titanium alloys.

一、前 言

钛合金具有良好的耐热性耐蚀性以及特别高的比强度，在航空与航天工业中已经得到了广泛的应用。但由于其导热系数和弹性模量小，特别是在高温条件下的化学活性大，因此反映在加工中，出现切削区温度高，刀——屑接触面积小，切屑与刀具粘结严重，径向力大以及刀具耐用度低等难加工现象，因而国内在推广使用钛合金的过程中迫切需要解决的一个问题就是它的难加工性。

国外几十年来为改善钛合金的切削加工性曾进行了大量的试验研究，取得了相当大的进展，国内近十年来也在这方面作了一些工作，但这些试验研究基本上集中在指出钛合金的难加工现象；切削用量、切削液、刀具材料和几何参数的选择等几个方面，关于切屑形成的机理，系统深入的研究资料尚不多见。虽然不少资料指出了钛合金具有强烈的化学活性，但未对这一点进行更多的研究，对某些问题，例如钛合金切削的加工硬化等，意见尚多分歧。本文运用爆炸型快速落刀装置“冻结”切削的技术，以及切削力和显微硬度的测定，在空气和氩气中切削的对比等方法，对钛合金车削过程的切屑形成机理展开初步的讨论，试图阐明钛合金难加工的主要原因，寻求改善钛合金切削加工性的途径。

二、实验方法与实验装置

1、实验方法与实验装置的讨论

长期以来，许多研究者在从事切屑形成的实验研究时采用了很多

方法，其中直接的方法有如下两种：

1) 快速落刀法。

利用快速落刀装置在某一瞬间以很快的速度使刀具脱离试件，获得一个如图1所示的在一定切削条件下的“根状切屑”试样，将试样制成金相磨片，研究金属切削层的变形情况。

2) 高速摄影——扫描电镜观察法。

利用高放大倍数的高速摄影机拍摄切屑形成过程，可以从外部观察切屑，得到一个完整的切屑形成过程的真实概念，并能看清瞬时的变化情况。当它与扫描电镜结合使用时，还可以观察到金属晶粒内部的微观滑移情况，使之能从金属物理的观点来理解金属切削过程及其现象。

上述两种方法中，当推快速落刀法简便经济，而且能够直接观察研究金相组织的显微变化，便于测量分析。我们采用的就是这种方法。

快速落刀法的关键是快速落刀装置必须具有足够大的初始加速度，以便得到一定切削条件下的“根状切屑”。文献〔3〕给出了根据切削速度和未经变形的切屑厚度（相当于二元车削的进给量）求相应初始加速度的公式。

$$a = 0.2 \frac{V^2}{a_c} \quad \text{mm/s}^2$$

式中 a_c ——未经变形的切屑厚度 (mm)。

V ——切削速度 (mm/s)。

实验中选用的切削速度范围为 $V = 10 \sim 39 \text{ m/min}$
 $= 170 \sim 650 \text{ mm/s}$ ；横向进给量范围为 $f = 0.1 \sim 0.27 \text{ mm/r}$ ，
因此，所需最大的初始加速度 a 应为：

$$a = \frac{0.2 \times (650)^2}{0.1} = 8.5 \times 10^5 \text{ mm/s}^2$$

我们采用的爆炸型快速落刀装置，初始加速度为 10^3 mm/s^2 (4)。因此所得到的“根状切屑”试样完全能够满足真正反映真实的切削条件，保持被切削材料的变形不被破坏这一要求。

2、实验方法

1) 图2是实验的切削示意图。当二元车削进行到预定落刀时间，爆炸型快速落刀装置动作，快速中断切削过程，得到“根状切屑”。

氩气保护切削时，氩气保持 $1.5 \sim 2$ 个大气压和足够大的流量，提前预吹 $1 \sim 2$ 分钟，以排除切削区周围的空气，达到在氩气保护的条件下进行切削的要求。

2) 在切削条件相似的情况下，利用电阻式三向车削测力仪，测量切向力 F_z 和径向力 F_y 。

3) 将所获得的“根状切屑”制成如图3所示的金相磨片试样。

制作金相磨片时，要将“根状切屑”试样的侧面——自由面多磨去一些，一般应磨去 $0.8 \sim 1 \text{ mm}$ ，目的是要除去切屑侧面产生的非平面塑性流变部分，以得到平面塑性流变形的切屑中间部位。

4) 测量“根状切屑”各部位的显微硬度。

三、实验结果

根据实验数据，通过计算可以得到切削比 τ_c 、剪切角 ϕ 与剪应变 γ 等数值(图4、5)。

切削比 τ_c 和剪切角 ϕ 通常由切屑厚度 a_c 的测定值计算，由图4的几何关系可得：

$$\tau_c = \frac{a_c}{a_0}$$

$$\tan \phi = \tau_c \cdot \cos \gamma_0 / (-\tau_c \sin \gamma_0)$$

由图5可得到剪应变 γ ：

$$\gamma = \cos \gamma_0 / \sin \phi \cos(\phi - \gamma_0)$$

将测量和计算所得的数值列入表1。

1、车削力

1、如图6所示，横向进给量 f 和刀具前角 γ 。对45钢和钛合金切向力 F_Z 与径向力 F_Y 的影响，其趋势是相同的。进给量 f 增大， F_Z 和 F_Y 逐渐增加；刀具前角 γ_0 增大， F_Z 和 F_Y 则逐渐减小。在 $V = 0.17 \sim 0.65 \text{ m/s}$ 的实验范围内，车削45钢时由于有积屑瘤，切削速度 V 对 F_Z 和 F_Y 的影响成驼峰形曲线关系。而车削钛合金时不产生积屑瘤，随着切削速度 V 的升高，切削温度增加很快，刀具很快出现磨损，因而 F_Z 和 F_Y 增大。

2、在相同的切削条件下，车削钛合金时切向力 F_Z 比45钢小，说明消耗的动力小，亦即切削过程的变形不大。

径向力 F_Y 则TC-9最大，TC-4次之，45钢最小。若将图6(a)各种材料的 F_Y / F_Z 数值进行比较可以得到：

$$\frac{F_{YTC-9}}{F_{ZTC-9}} = 0.73 \sim 0.78$$

$$\frac{F_{YTC-4}}{F_{ZTC-4}} = 0.68 \sim 0.75$$

$$\frac{F_{Y45钢}}{F_{Z45钢}} = 0.45 \sim 0.50$$

显然钛合金的 F_Y / F_Z 数值是45钢的1.5倍左右，这是由于钛合金弹性模量小引起的，说明车削钛合金时刀具后刀面和试件接触面积大，产生较大的后刀面摩擦，使刀具易于磨损。当加工薄壁零件时容

易产生变形而影响加工精度。

2、切削比·剪切角·剪应变

切削比 r_c ，剪切角 ϕ 和剪应变 γ 三者都是衡量金属切削过程变形程度的标志。当切削比 r_c 升高时剪切角 ϕ 增大，表明切削过程的变形程度下降。

根据表1所示的剪应变 γ 计算值可知，在刀具前角 $\gamma_0 = 0^\circ \sim 30^\circ$ 的范围内，当剪切角 $\phi < 45^\circ$ 时，若 ϕ 增大则 γ 减小，切削过程的变形程度下降；但当 $\phi > 45^\circ$ 时，上述关系不复存在，这是由于剪应变 γ 计算公式的局限性造成的。车削钛合金时，剪切角 ϕ 均大于 45° ，因而上述关系是不适用的。

1) 从表1数据可知，车削45钢时切削比 r_c 小于1，而钛合金大于1（氩气保护切削的部分情况除外），亦即切屑厚度 a 。小于未经变形的切屑厚度 a_c ，得到的是负变形（即与切削层尺寸比较切屑长度增大，切屑厚度变薄的变形）。45钢的剪切角 ϕ 小于切削晶粒伸长方向与切削速度方向的夹角 θ （参看图7），其数值小于 45° 。而钛合金的剪切角 ϕ 大体上等于 θ 角，其数值大于 45° （氩气保护切削的部分情况除外） $\phi \approx \theta$ 意味着切屑与前刀面的摩擦变形不大，刀——屑接触面积小。上述情况均证明车削钛合金时的变形程度较小。

2) 如图8所示，同样是切削TC-4，在氩气保护的情况下，切削比 r_c 和剪切角 ϕ 减小，甚至出现 $r_c < 1$ ， $\phi < 45^\circ$ 的现象，说明变形程度明显增加。

3) 图8表示由于进给量 f ，切削速度 v 和刀具前角 γ_0 的改变引起切削比 r_c 和剪切角 ϕ 变化的情况。随着 f 和 γ_0 的增大，钛合金和45钢的 r_c 和 ϕ 变大，变形程度下降。在切削速度

表1 车削钛合金和45钢时测量与计算的数值

实验 条件	工件材料	45钢(HRC15 ~16),		
	刀 具	材 料		α_0
		W18Cr4V		10°
序号	试件材料	切削速度 $V(m/s)$	进给量 $f(mm/r)$	刀具前角 $\gamma_0(度)$
1	45钢	0.33	0.10	10°
2	45钢	0.53	0.15	10°
3	45钢	0.33	0.20	10°
4	45钢	0.33	0.27	10°
5	45钢	0.22	0.15	10°
6	45钢	0.53	0.15	10°
7	45钢	0.65	0.15	10°
8	45钢	0.33	0.15	0°
9	45钢	0.33	0.15	15°
10	45钢	0.33	0.15	20°
11	45钢	0.33	0.15	30°
12	TC-4	0.33	0.10	10°
13	TC-4	0.33	0.15	10°
14	TC-4	0.33	0.20	10°
15	TC-4	0.33	0.27	10°
16	TC-4	0.22	0.15	10°
17	TC-4	0.26	0.15	10°
18	TC-4	0.53	0.15	10°

TC-4 (HRC34~35), TC-9 (HRC39~40)

	α'		λ_s		ϕ_{er}	
	5°		0°		90°	
切削条件	切削力		切削比	剪切角 ϕ (度)	剪应变 γ	
	$F_z(Kg)$	$F_y(Kg)$				
干切削	60.2	30	0.57	32°27'	1.986	
干切削	92	40	0.71	38°23'	1.802	
干切削	123.9	58.8	0.82	43°8'	1.720	
干切削	162.2	75.9	0.84	44°14'	1.707	
干切削	106.8	51.3	0.48	27°29'	2.238	
干切削	97.44	52.5	0.36	20°47'	2.825	
干切削	93.8	56.3	0.37	21°18'	2.764	
干切削	94.4	45	0.37	21°2'	2.985	
干切削	93.8	32				
干切削	89.7	25	0.45	25°55'	2.164	
干切削			0.52	29°14'	1.773	
干切削	50.2	34	1.068	52°15'	1.682	
干切削	76	48	1.429	61°53'	1.809	
干切削	89.4	64	1.455	62°27'	1.822	
干切削	122	92	1.862	69°45'	2.084	
干切削	70.8	31.3	1.339	59°48'	1.765	
干切削			1.364	60°24'	1.777	
干切削	84	62.5	1.765	68°15'	2.015	

续1

19	TC-4	0.65	0.15	10°	干切削
20	TC-4	0.33	0.15	0°	干切削
21	TC-4	0.33	0.15	15°	干切削
22	TC-4	0.33	0.15	20°	干切削
23	TC-4	0.33	0.15	30°	干切削
24	TC-4	0.33	0.10	10°	氩气保护
25	TC-4	0.33	0.15	10°	氩气保护
26	TC-4	0.33	0.20	10°	氩气保护
27	TC-4	0.33	0.27	10°	氩气保护
28	TC-4	0.22	0.15	10°	氩气保护
29	TC-4	0.53	0.15	10°	氩气保护
30	TC-4	0.65	0.15	10°	氩气保护
31	TC-4	0.33	0.15	0°	氩气保护
32	TC-4	0.33	0.15	15°	氩气保护
33	TC-4	0.33	0.15	20°	氩气保护
34	TC-9	0.33	0.10	10°	干切削
35	TC-9	0.33	0.15	10°	干切削
36	TC-9	0.33	0.20	10°	干切削
37	TC-9	0.33	0.27	10°	干切削
38	TC-9	0.17	0.15	10°	干切削
39	TC-9	0.22	0.15	10°	干切削
40	TC-9	0.27	0.15	10°	干切削
41	TC-9	0.33	0.15	0°	干切削
42	TC-9	0.33	0.15	15°	干切削
43	TC-9	0.33	0.15	20°	干切削

112.7	38			
88	52	1.395	54° 22'	2.112
6.9	36			
62	27.5	1.463	70° 21'	1.556
		1.500	79° 6'	1.347
		1.013	50° 26'	1.678
		1.026	50° 52'	1.679
		1.119	53° 50'	1.691
		1.701	67° 11'	1.971
		0.857	44° 46'	1.703
		1.053	51° 45'	1.681
		1.250	57° 33'	1.729
		0.667	33° 41'	2.167
		0.750	41° 57'	1.621
		0.882	49° 54'	1.417
59	46.3	1.111	53° 37'	1.690
86	62.5	1.304	58° 56'	1.750
100.3	75	1.482	63° 1'	1.857
122.7	96.3	1.543	64° 16'	1.872
70.2	43.1	1.000	50°	1.678
72.6	45.6	1.111	50° 37'	1.679
75.5	46.9	1.200	56° 11'	1.712
92	70	1.053	46° 28'	2.002
82.6	55	1.091	55° 45'	1.543
69.3	45	1.225	63° 11'	1.444

$v = 0.17 \sim 0.65 \text{ m/s}$ 范围内, 车削 45 钢时, 由于有积屑瘤, 切削速度 v 对 r_c 和 ϕ 的影响成驼峰形曲线关系; 但钛合金不产生积屑瘤, r_c 和 ϕ 的变化是单调的, 随着 v 的升高, r_c 和 ϕ 增大。

3. 显微硬度

将图 9 所测“根状切屑”各部位的显微硬度数值选其有代表性的点列于表 2。

1) 从表 2 可知, 车削 45 钢时已加工表面和切屑的加工硬化程度较大; 而钛合金在干切削时, 已加工表面硬化程度很小, 切屑硬化也不高。

2) 钛合金氩气保护切削时, 已加工表面和切屑的加工硬化程度均比干切削时有明显的提高, 说明变形程度增大。

四、实验结果的分析讨论

1. 切屑类型。切屑形成机理

1) 在相同的切削条件下, 钛合金与 45 钢切屑类型的比较。

车削过程中, 45 钢, TC-4 与 TC-9 得到的均是发条状切屑。然而观察金相磨片 (图 10) 发现它们之间有一些差异。45 钢切屑龟裂现象很少, 是典型的带状切屑。而钛合金干切削的切屑磨片有如下三个明显的特征:

- (1) 被切削材料在前刀面前方膨胀隆起;
- (2) 第一和第二变形区的变形均不如 45 钢明显;
- (3) 切屑成片状, 背面裂纹既深且宽, 滑移线间隔出现, 即每隔一段切屑长度才能观察到若干条滑移线。

因此, 钛合金干切削得到的切屑属于挤裂型的片状切屑。

钛合金 TC-4 氩气保护切削所得到的切屑, 从金相磨片上看,

表2 “根状切屑”各代表点显微硬度数值及其与基体显微硬度的百分比

测量显微硬度		的部位					注	
试件序号	试件材料	切削条	基体	已加工表面	第一变形区	第二变形区	切屑滑移线密集处	积屑瘤处
			HV	HV	HV	HV	HV	HV
4	45钢	干切削	207	294	332	299	353	421
			100%	142%	160%	144%	171%	203%
15	TC-4	干切削	256	273	304	299	332	
			100%	107%	119%	117%	130%	
27	TC-4	氩气保护切削	264	294	374	279	362	
			100%	111%	142%	106%	137%	
37	TC-9	干切削	257	286	312	303	330	
			100%	111%	121%	118%	128%	

(1) 已加工表面处取最靠近已加工表面的点为代表点；
 (2) 第一、二变形区，切屑滑移线密集处和积屑瘤处均取其中硬度最大的点为代表点。

尽管滑移线依然间隔出现，但前刀面前方的膨胀隆起现象消失，背面裂纹的宽度和深度均很小，向带状切屑转化，可以认为是近似带状切屑。

2) 切屑形成机理的讨论

从图 10 (a) 45 钢金相磨片可以看出，假如忽略若干的不规则性，其变形大体上是连续进行的，因此 45 钢带状切屑的形成可以认为仅根据均匀塑性变形进行。对不同切削速度所取得的金相磨片进行分析比较，可以发现切削速度增大，第一变形区的厚度变薄。如果将第一变形区的变形理想化，亦即 OAM (图 7) 变薄到近似为一个平面——剪切面，再忽略第二变形区的变形，就可以得到图 11 所示的剪切面切削模型。

钛合金属于挤裂型片状切屑，变形的过程远比带状切屑复杂，根据金相磨片的分析，大致可以分为三个不同的阶段：

- (1) 被切材料在切削刃的前上方出现微小的破裂面；
- (2) 被切材料受到前刀面的挤压，微小破裂面上方的一片材料 (即图 12 b 中的材料 I) 膨胀隆起；
- (3) 这片膨胀隆起的材料 (即图 12 c 中的材料 I) 在剪切面被剪切，发生局部或全部断裂成为切屑流出。

当第 I 片材料受到剪切时，紧靠它后面的一片材料同时被挤压，重复上述过程，最终成为图 10 (b)、(d) 所示的片状切屑。

根据上述分析，可以得到图 12 所示的钛合金片状切屑形成的阶

段模型。

氩气保护切削钛合金TC-4时，所得到的是近似带状切屑，作为片状切屑特征的现象，如被切材料在前刀面前方膨胀隆起以及背面出现既深且宽的裂纹等已消失，但切屑上滑移线间隔出现的现象依然存在，说明仍有剪切前的挤压阶段，尽管如此，其形成机理可认为与45钢带状切屑类同，基本上符合图1/1所示的剪切面切削模型。

2、钛合金的化学活性·难加工的主要原因

有的研究者指出，钛合金片状切屑的形状，不能通过切削速度等的变化转变为连续型的带状切屑。实验中，我们在一定范围内改变切削速度、进给量和刀具前角所得到的也都是片状切屑。但是钛合金是一种塑性金属，其伸长率和收缩率与45钢虽有差异，但不显著（TC-4： $\delta\% = 10$ ， $\psi\% = 30$ ；而45钢： $\delta\% = 17$ ， $\psi\% = 40$ ），为什么总是得到片状切屑？我们认为钛合金这一特殊情况产生起因于钛合金强裂的化学活性。当被切材料临近第一变形区时，得到了与周围介质气体氢、氧和氮等产生强烈化学反应的高温条件，钛合金和氢气等气体化学反应后，被切材料脆化，强度迅速下降，变形阻力变小。因而出现在前所述的挤裂型片状切屑的形成过程。

为了进一步证明这一点，进行了钛合金氩气保护切削与干切削情况的对比。观察氩气保护切削所得的金相磨片，可看到被切材料在前刀面前方膨胀隆起现象消失，两个变形区的变形程度增大，切屑背面裂纹深度与宽度大大减小，切屑滑移线密集程度增加，向带状切屑转

化。这显然是由于氢气隔绝了钛合金和氢气等气体的接触，抑制了它的化学活性作用的缘故。

钛合金片状切屑形成过程中，剪切面的法向应力在刀尖一侧常常是拉应力，而另一侧为压应力，合成结果得到一个力 B' 和一个力矩 M_s （图13）〔5〕。这力和力矩，再加上切屑背面的深而宽的裂纹，促使切屑离开刀刃后很快卷曲。另外，钛合金的组织是六方晶格结构，在切削条件下，孪晶的形成使这一卷曲现象更加严重〔6〕。

切屑的很快卷曲，使切削时的高温高压集中于刀具的薄弱部位——刀刃处，再加上钛合金的弹性模量小，试件与后刀面接触面积大，后刀面摩擦大，刀刃部位处于极恶劣的条件下工作，容易发生磨损。

氢气保护切削钛合金时，切屑卷曲推迟，刀——屑接触面积增大，刀具磨损情况有所改善。从而有理由可以推断钛合金强烈的化学活性是难加工的主要原因。

3、改善钛合金切削加工性的一个重要方面。

既然钛合金难加工的主要原因是它的强烈化学活性，因而为了改善钛合金的切削加工性，自然就应设法消除和抑制这种化学作用。从理论上而言较好的方法是用惰性气体保护，隔绝钛合金在切削过程中与氢气等气体的接触，但生产中要做到这一点是极为复杂而昂贵的。较现实的方法，是筛选出具有既能降温又能抑制钛合金化学活性的切削液。按国外某些专利介绍〔7〕，使用高氯化油或水基氯化耐压添加剂活性切削液，对提高刀具寿命，改善切削加工性有一定的效果。我