

# 金属切屑中绝热剪切变形

傅惠南 陈子文

(精密机械工程系)

**摘要** 分析金属高速变形的绝热剪切塑性失稳现象,并引入金属切削领域,阐述金属切屑中热塑失稳机理,并讨论绝热剪切带的特征。

**关键词** 绝热剪切,塑性失稳,切屑变形带

## 引言

金属的绝热剪切,是描述高变形速率大变形条件下,金属材料伴随产生的高度局部化塑性流变现象。这一现象例如,已使用后的钢丝绳表层出现一层白亮的金属变形层组织,相类似的变形组织还普遍存在于受弹道冲击的金属弹、靶、炮管内壁,以及承受爆炸荷载的多种金属和合金中。在机械加工中,同样广泛存在金属变形现象。人们逐渐认识到,这一现象的出现与金属绝热剪切带的产生有关<sup>[1-3]</sup>。通常,金属发生绝热剪切将产生剪切变形带。它们的大多数情况基于热塑失稳的原因,即金属强烈的局部化塑性流变,归因于材料的软化大于应变强化作用而导致的塑性变形的不稳定。但是,金属变形带的出现包含很广的范围和条件,以及复杂的形成机制和影响因素<sup>[4]</sup>。例如,本文涉及的金属切削加工就包含复杂的金属变形及作用因素,其中一些条件下切屑出现曲型的剪切变形带。

绝热剪切现象研究的意义,在于它是特定条件下材料抗载能力失效的途径,涉及到材料科学、军事工程以及工程技术领域的开发研究和应用。

## 1 绝热剪切的力学特征

金属发生绝热剪切,变形具有强烈的局部化特征,这是一种塑性失稳现象。金属的塑性失稳也发生在准静态加载条件下或某些承载状态下的金属变形过程,典型地如单向拉伸时,金属材料发生的颈缩现象,变形由原来相对均匀的区域发展成集中于部分区域的变形,导致塑性变形失稳和破断。其原因是应变强化不足以抵偿承载面积的减小所致。图1a是这种状态下的应

本文1992-08-26收到。

力应变曲线,  $r_0$  为颈缩产生时的应变, 此时工程应力已达最大值, 而材料的真实抗载能力实际仍随应变的增大而增大. 绝热剪切条件下变形金属发生的塑性失稳属于热塑失稳, 塑性变形能瞬时转化为热导致材料热软化, 后续应变得以继续进行从而变形失稳, 图1b 是绝热加载和准静态加载真应力应变曲线比较, 前者发生热塑失稳时应力达到最大并且通常应变变量很大. 这两

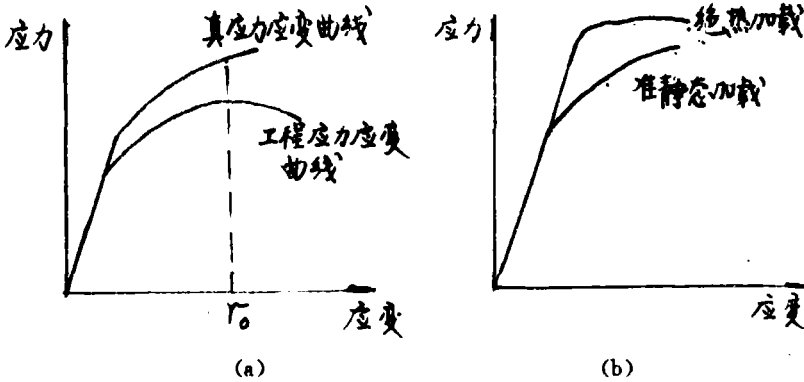


图1 a. 准静态条件下材料应力应变曲线, b. 绝热加载与准静态加载应力应变曲线

种类型塑性失稳的特点: (1) 准静态条件下塑性失稳, 外加载荷  $p$  获得最大值为  $dp=0$ ; (2) 绝热条件下加载, 发生热塑失稳, 真应力达到达最大为  $d\sigma=0$ .

## 2 剪切变形带

绝热条件下金属变形塑性失稳将导致变形带的形成. 高速变形后的金属组织中形成的变形带就是因为这种条件下瞬时变形使金属在局部区域因变形热形成绝热加热, 一旦材料的热软化效应大于形变硬化效应, 该区域的金属发生变形失稳, 其结果使其后的塑性变形进一步因变形热更加集中在狭小的具有高的应变率和大应变的范围, 从而形成了变形带. 此外变形带形成的难易与具体条件和材料有关, 通常还必须获得一定的相对均匀变形后才发生热塑失稳.

## 3 变形带宽度

绝热剪切带的另一个明显特征是不同的条件下形成的变形带具有不同的带宽  $\delta$ . 虽然影响带宽的因素是复杂的, 目前尚有诸多问题有待研究, 但作为主要影响因素文献[2]给出如下关系式

$$\delta = \left( \frac{\lambda T_*}{\tau_* \dot{\gamma}} \right)^{\frac{1}{2}}, \tag{1}$$

其中,  $\lambda$  为热导率,  $T$  为温度,  $\tau$  为剪应力,  $\dot{\gamma}$  为应变速率, 下标  $*$  表示对应于剪切带内数据.

另一方面, 在绝热剪切条件下, 剪切抗力  $\tau_*$  与温度  $T_*$  实际存在某种关系, 它们与材料性质有关, 与应变程度有关. 因此, 带宽实际上与材料性质和加载变形条件有关.

#### 4 热塑失稳的临界应变 $\gamma_0$

金属变形发生热塑失稳经历了相对均匀的变形,设热塑失稳的临界应变量为  $\gamma_0$ ,产生失稳时应力达到最大,可以写为

$$\left. \frac{d\tau}{dr} \right|_{r=r_0} = 0. \quad (2)$$

设材料的本构关系为  $\tau = \tau(r, \dot{r}, T)$ , 则

$$\left. \frac{\partial \tau}{\partial r} \right|_{r_0} + \left. \frac{\partial \tau}{\partial \dot{r}} \right|_{r_0} \frac{d\dot{r}}{dr} + \left. \frac{\partial \tau}{\partial T} \right|_{r_0} \frac{dT}{dr} = 0 \quad (2')$$

若材料服从如下规律

$$\tau = K r^n \dot{r}^m h(T), \quad (3)$$

其中,  $\tau$  为剪应力;  $r$  为应变;  $K$  为系数;  $n, m$  分别为应变硬化指数和应变速率硬化指数. 又绝热变形条件下

$$dT = \frac{\beta \tau dr}{\rho c}, \quad (4)$$

其中  $\beta$  为变形能转化为热的比率, 一般  $0.9 < \beta < 1$ ;  $\rho$  为材料密度;  $c$  为热容. 那么, 代入微分方程(2')整理后可得

$$r_0 = \frac{n}{\frac{\beta}{\rho c} \left( - \frac{\partial \tau}{\partial T} \right) \bigg|_{r_0} - \frac{m}{r} \frac{d\dot{r}}{dr} \bigg|_{r_0}}, \quad (5)$$

式中分母第一项反映热软化的作用, 第二项反映应变速率的作用. 但在变形过程中若应变速率基本不变, 则  $\frac{d\dot{r}}{dr} \approx 0$  第二项应变速率的影响可忽略, 热塑失稳临界应变  $r_0$  主要受热软化效应的影响

$$r_0 = \frac{\rho c n}{\beta \left( - \frac{\partial \tau}{\partial T} \right) \bigg|_{r_0}} \quad (5')$$

此外,  $r_0$  还和材料的物理性质 ( $\rho, c, \beta, n$ ) 有关.

#### 5 切屑全相的剪切变形带特点

以上讨论是假设金属变形在绝热条件下进行, 并忽略实际过程中其它因素的影响. 当变形速度充分大时近似这种情况. 但对于不同材料或当变形条件不同时, 金属出现热塑失稳的情形不同, 变形带的形成包含在很广的变形范围内, 大多数情况不能完全当作绝热处理. 尤其工程上观察到的金属热塑失稳现象实际是综合了多因素的作用, 以致不同方法、条件下形成的剪切变形带具有不同的形态和特点. 因此经常需要对具体情况加以分析. 下面, 基于上述讨论, 我们对金属切削领域中剪切变形带的特点加以讨论.

金属切屑产生的热塑失稳现象目前讨论研究尚不多, 其实, 这是金属切削过程中的普遍现象. 尤其是加工速度的提高, 或切削加工某些特殊材料, 这一现象更为普遍. 切屑变形程度与具

体的加工条件有关,其中一些条件下产生典型的热塑失稳现象,切削加工的这一特点为研究金属在不同的条件下变形提供了很大的便利.

图 2 是通常切削加工 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的切削纵剖面金相,变形组织中出现了变形带,如箭头所示.这是很典型的情形,切屑形成时发生了塑性失稳,变形金属沿一定方向流变,从切屑近底部向切屑顶面发展形成变形带,如图所示.变形带有明显的区域,相对其两侧,带内金属变量很大,已不能分辨其组织.可以看出,变形带的形成既不沿某个晶体学滑移系、也与晶体学方位无关.整个变形带穿过数个晶粒或晶团,且无明显的受晶界或析出相影响的迹象.切屑的形成,事实上,金属的变形是在剪切应力与压应力的复合作用下按某一方向发展.在图 2 中变形带宽度约  $100\mu\text{m}$ ,这种在局部区域发生大塑性流变,反映了切屑形成的热塑失稳特点.

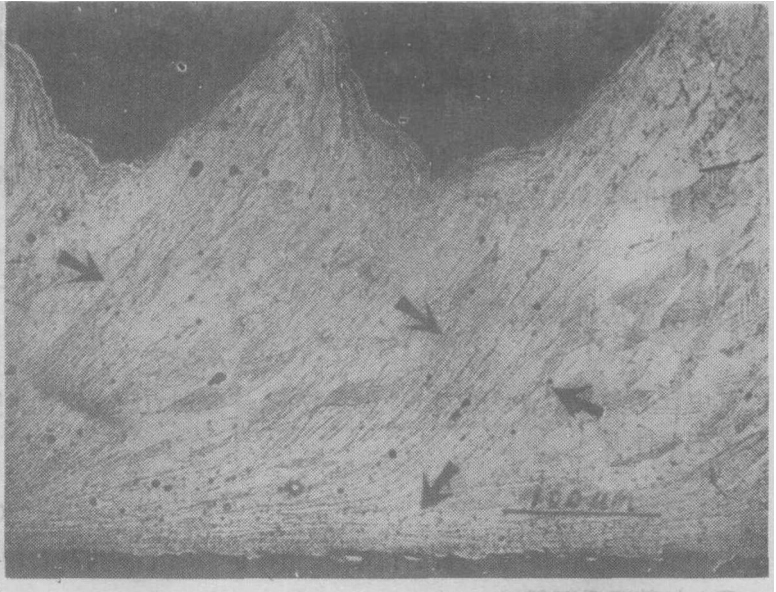
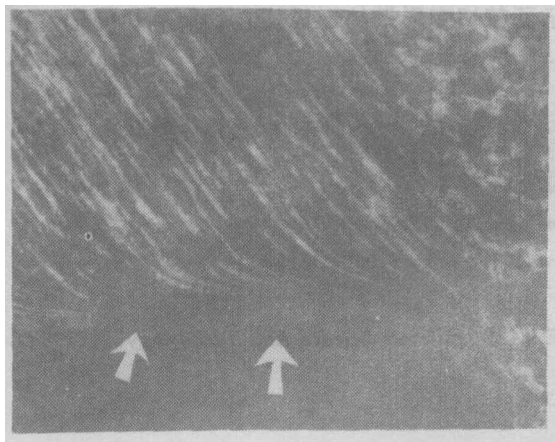
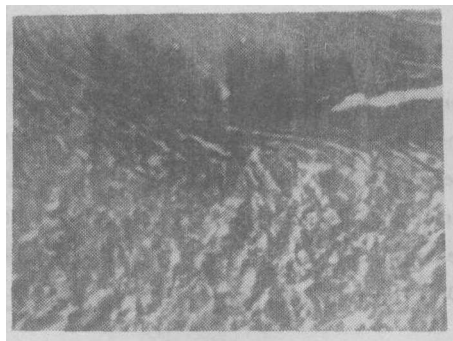


图 2 1Cr18Ni9Ti 切屑中剪切变形带  
(切削速度  $v=100\text{m/min}$ )

在图 2 的切削加工条件下,切屑的基体变形量相对较小,可通过实验测量计算切削厚比,算出该切屑平均应变量  $r$  约为 3. 该数值较热塑失稳的临界应变值  $r_0$  要大些,这是因为变形带集中了切屑的一部分变形量,实际基体的变形要小些. 如图所示,切屑基体的变形组织仍保持较完整的形态,与变形带内的组织相比,说明金属发生热塑失稳前经历了相对均匀的变形. 该试样获取时切削速度  $v=100\text{m/min}$ ,平均应变速率为  $10^5-10^6$ .

金属切屑,变形最严重的部分是切屑与切削刀面(前刀面)接触的区域,这部分金属经历了二次变形,形成了所谓的滞流层. 如图 2 中底部,沿整个切屑底面构成了一带状组织,这也是由于局部区域热塑失稳促使金属流变,即开成了变形带. 图 3 是通过快速落刀方法瞬时“冻结”切削过程所显示的切屑变形过程,从中可以看到滞流层区的形成. 如箭头所示,切屑一面形成,一面沿前刀面向外排出并在此发生二次变形,切削速度较大时便发生塑性失稳,形成与排出方向平行的一薄层流变组织,其变形量很大. 图中这一薄层厚约  $30-40\mu\text{m}$ . 事实上,这个变形区也是切削温度达到最高的区域,某些情况下,温度可高于  $800^\circ\text{C}$ ,这就是说,金属切屑底面是极易产生热塑失稳的区域. 一般地,在通常切削加工条件下,这部分区域与切屑变形区存在过渡范围,但过渡范围的区域及明显程度与切削速度、变形条件有关. 提高切削速度将使局部化塑性流变特征更加显著,过渡区范围减小.

剪切变形带通常都由这两部分组成:变形带的中心区及其与周围联系的过渡区. 但过渡区随具体的变形条件变化甚大. 对于充分发展形成的变形带,过渡区可能很不明显甚至不可辨

图3 滞流层变形带(45钢 $\times 100$ )图4 变形带塑性流变特点(45钢,  $v=25\text{m/min}$ )

认. 这说明变形带形成的复杂性. 图2. 3切屑中形成两种不同形貌的变形带也反映了一点.

当变形速度较低时, 我们可以从切屑分离处观察这种塑性流变过渡区特征. 如图4所示, 这是以 $25\text{m/min}$ 切削速度切削45钢的情形, 上部分是切屑分离物, 下部分是被加工材料基体. 在电镜观察下, 切屑分离处致密的层片状变形组织是珠光体与铁素体参与流变的结果. 图中脆性的珠光体除部分发生破断, 其余的也参与塑性变形. 这表明, 在这种变形条件下, 脆性的渗碳体也获得了一定的变形能力. 关于这一问题有待进一步的观察讨论.



图5 铜屑滞流层 TEM 形貌

对于变形带的中心区, 由于强烈的局部化流变, 通常金属的变形组织在光学显微镜下已难以辨认. 这部分金属, 在某些变形条件下甚至会因为绝热加热使温升达到相变点以上温度, 从而产生相转变类型的变形带. 在金属切削加工领域, 也曾观察报道滞流层区金属产生马氏体转变的研究<sup>[5]</sup>. 因此变形带实际还包括两种类型: 形变带和转变带. 对于充分发展形成的变形带, 一般认为其中心区的变形组织是细小的( $0.3\sim 0.6\mu\text{m}$ )等轴微晶或是拉长的平行片束亚结构. 如图5, 是在铜屑滞流层范围 TEM 观察下金属变形组织所显示的形貌, 它们由细小的等轴晶组成尺寸约 $0.2\sim 0.5\mu\text{m}$ , 包含很少的位错, 说明变形带的形成包含回复或再结晶的过程.

## 6 结语

金属绝热剪切现象是金属塑性变形的特殊现象之一, 其特点是金属变形发生了热塑失稳. 这是材料在特定条件下抗载能力失效的途径. 绝热剪切一般发生在应变速率较大的情况下, 并形成变形带. 由于变形条件不同, 变形带呈现各种形貌特征, 但本质上它们具有热塑失稳局部化塑性流变特征. 金属切削也普遍存在金属热塑失稳变形这一现象, 对绝热剪切的研究将有助

于切屑形成机理的认识. 本文的研究讨论也揭示了剪切变形带的形成将在切屑高速变形过程起重要的作用.

### 参 考 文 献

- [1] Zener, C. and Hollomon, J. H. , *J. Appl. Phys.* , 15(1944), 22.
- [2] Dodd, B. and Bai, Y. , *Materials Science and Technology* , 1, (1985), 38.
- [3] Meyers, M. A. and Wittman, C. L. , *Metall. Trans. A* , 21A, (1990), 3153.
- [4] Timothy, S. P. , *Acta Metall.* 35, 2(1987), 301.
- [5] Shelbourn, A. M. , Roberts, W. T. and Trent, E. M. , *Materials Science And Technology* , 1, (1985), 220.

## Adiabatic shear Deformation in Machined Metal Chips

Fu Huinan

Chen Ziwen

(*Department of Precision Mechanical Engineering*)

**Abstract** An important phenomenon of plastic flow instability occurs in metal materials when they are deformed at high strain rate known as adiabatic shear. The authors analyse and discuss this phenomenon and bring this problem into the field of metal cutting. The discussion is also devoted to the mechanism of thermal plastic instability in deformed chips and the structural features of the deformation bands.

**Key words** adiabatic shear, plastic flow instability, chip, deformation