

切屑形成的电镜研究

吴惠贞 蔡光仁 吴洛平 陈子文*

(精密机械工程系)

摘 要

切削过程中金属层流过剪切区发生塑性变形后形成切屑。抛光的板状纯铁作被加工材料,通过刨屑快速退刀获得的切屑,用光学显微镜及扫描电子显微镜观察切屑层片内的表面滑移带。滑移带的数量、形状和分布,可反映金属塑性变形的程度和方向,并可间接地推测位错的行为。滑移带间距为 $1-3\mu\text{m}$,带与带之间基本上无塑性变形。层片宽度为 $30-50\mu\text{m}$,比滑移带间距大一个数量级,各层片内有数量不等的滑移带。研究结果说明在一般切削条件下, ($a_p = 0.3, 0.7\text{mm}$),切屑形成由层片间发生相互变形和层片内晶面发生滑移引起的。

引 言

切削加工的效率很大程度上是由工件材料和刀具材料在刀具切削刃附近界面上的性能所决定。尽管切削加工的方式是多种多样的,但它们都具有某些共同的特征,即几乎所有的切削加工都要用具有切削刃的楔形刀具,从工件上去除一层材料,被切除的金属层首先会因剪切作用发生塑性变形。剪切大致上在“剪切区”内,部分金属在很短的时间内通过“剪切区”,发生了很大的塑性变形而形成切屑。对于切屑的研究有着重要的理论和实践意义。

S. Ramalingam 和 J. T. Black^[1-3]用微切削法(微米级)以高压透射电镜和扫描电镜研究铝、铜、钢屑,提出切屑形成过程是不连续的,它由剪切面(Shear Front)把切屑分离成层片(Lamella Structure),剪切面宽约 500\AA ,层片宽度随切削深度而变,一般为 $2-4\mu\text{m}$,层片内基本上不发生滑移。我们曾根据 Black 等人的数据和照片^[1, 2]测量了铝和 α 黄铜滑移带的间距为 $1\sim 2\mu\text{m}$ 。因此 Black 等人指出的层片宽度与滑移带间距属于同一个数量级,层片内基本上不发生变形是符合晶体滑移规律的。

但是,当切削条件改变时,在普通切削条件下,层片宽度远大于微米级^[4-6]。它的剪切滑移是否仅局限于把层片隔开的剪切面上?在层片内是否也基本上不发生滑移?微切削的“层片间无变形”结论能否也适用于一般切削?

对黑色金属而言,滑移是塑性变形的形式。滑移带的形态、分布、数量标志着塑性变形的部位、方向和程度,间接地了解位错在滑移面上的运动和交互作用。

本文1985年9月23日收到。

• 檀美德、邓诗赞同志参加部分试验工作。

本文根据滑移带出现的数量、分布、形状,判断一般厚度切削中,切屑发生塑性变形的特点以及滑移带和层片间的关系。

试 验 方 法

用纯铁制成两个平板状试样,形状如图1。

将工件侧面和顶面在金相抛光机上抛光后,两个试样对齐夹紧进行切削。

刀具几何角度:

$$\alpha = 45^\circ, \alpha = 6^\circ$$

切深:

$$0.3\text{mm}, 0.7\text{mm}$$

用机动进刀,快速退刀法切削已经抛光的顶面,操作前用丙酮清洗刀具,使切削在清洁无润滑的条件下进行。

用 HITACHI S-520 型扫描电子显微镜观察切屑及工件的变形后,再制备成金相试样在光学显微镜下观察。

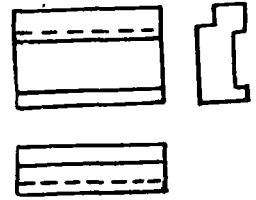


图 1. 试样形状示意图

试 验 结 果 及 分 析

1. 层片的形貌

图版 I 2(及下图版 I 1, I 3—8, I 9—11, 均见 103 后插页)为纯铁切屑形貌,从切屑的顶部到侧面都可以明显地观察到金属经过剪切阵面形成的层片形貌,说明了在切削过程中切屑形成的不连续性。图中是采用切深较小,切屑侧流严重的情况。为了减少侧流影响,采用被加工材料两半拼合的方法,切深由 0.3mm 加大到 0.7mm (图版 I 3)。

切屑侧面低倍下层片的宽度既不均匀,沿着长度方向也不平直,与理论剪切面之间相差一个锐角。本试验没有发现有层片从底面一直延伸到顶面的,在高倍下层片成波浪式(图版 I 4)。切屑顶部层片厚薄不均匀程度比侧面更严重些,已形成“麻花状”的程度。层片的顶面是一个曲面,系中间凸起两边稍低的形状。图版 I 5 是切屑的顶,侧面交界处形貌,切屑顶面金属被挤压出成圆弧的现象清楚可见,说明顶部金属的变形不仅来自剪切面,也来自于其它应力引起的附加变形。

2. 层片的尺寸

体心立方晶格结构的纯铁,切屑中层片尺寸如表 1 所示。在本试验的范围内,层片一般平均宽度在切屑区为 30~50 μm ,最长的层片为 370 μm ,最短的为 167 μm ,其侧面层片最宽的为 83 μm ,最窄的为 17 μm ,层片的变化相差悬殊,说明层片形成和变化的复杂性。

表 1

部 位	层 片 宽 度 (μm)		滑 移 带 之 间 之 距 (μm)		晶 粒 尺 寸 (μm)
	切屑侧面	切屑顶面	切屑侧面	切屑顶面	
切 屑	30—40	40—50	1.7—2.0	3.0—3.6	20—35(短轴)
剪 切 区	/	/	~1.5	/	~50(等轴晶)

3. 层片中的滑移带

金属的切削过程是材料的塑性变形和开裂过程,从微观角度而言,是金属中位错的运动和相互作用的结果。当运动着的位错沿着某些特定的晶面运动到金属表面,形成一台阶即是滑移线。在金相显微镜或电子显微镜中均可观察到滑移带,因此,通过观察切屑中的滑移带,可以说明切屑变形的程度和方向。

图版 I 4, 1 为切屑顶部和侧面层片中的滑移带分布,图版 I 6, 7 为高倍照片;图版 I 8 为切屑侧面交界附近的滑移带分布,从滑移带的分布可观察到:

(1) 切屑的层片中有滑移带,说明层片内由位错运动引起的塑性变形,滑移带的密度标志变形量。

(2) 切屑顶面的滑移带基本上与层片相平行(图版 I 6),而侧面的滑移带与层片形成一锐角(约成 45°)如图版 I 7 所示。

(3) 切屑顶,侧面都有交叉滑移的现象,说明通过剪切面参加剪切变形的晶面,是有互不平行的各种晶面。

(4) 从图版 I 8 可以看到,从切屑侧面到顶面滑移带是连续的。滑移带与层片的交角在侧面(约成 45°)和顶面(平行)不同,可能是晶体内的滑移面相对于层片来说是倾斜的,面心立方晶格的纯铜切屑中也有类似现象^[4]。

(5) 切屑侧面、顶面内滑移带间的间距都为微米级(如表 1 所示),约 $1\sim 3\mu\text{m}$,相对于层片间距(层片厚度)小一个数量级。

4. 滑移带的变化

滑移带的出现反应了切削金属的塑性变化的变化。因此,可以通过电镜观察整个切削区的变形情况。图版 II 9 表示材料在“剪切区”内的滑移带分布照片,部位选自刀尖附近。

(1) 纯铁在未达到理论剪切面之前,即在上界限时已发生塑性变形,晶体的交滑移现象清晰可见。众所周知,多晶体内发生塑性变形时,位错运动遇到晶界即将受阻,滑移线到晶界处终止或改变方向。根据滑移带的走向,可以判断纯铁大致的晶粒尺寸。从图版 II 9 的下部可以看到,在“剪切区”内晶界已由等轴晶沿剪切面成一角度方向拉长,而滑移带与晶界形成一锐角。刀尖附近晶内滑移带的密度和晶界变形的程度最大,并向远离刀尖的上部递减。

(2) 切屑的金相组织变化:

经电镜分析的有滑移带的试样制备成金相试样,金相组织如图版 II 10, 11 所示,金属通过“剪切区”晶粒形状的变化过程与滑移带变化趋势相一致。

测量了各个部位的晶粒尺寸(表 1)。未变形部位等轴铁素体晶粒尺寸为 $50\mu\text{m}$ 左右,切屑部位拉长的晶粒短轴平均尺寸约 $30\mu\text{m}$ 。有趣的是晶粒尺寸的数值与层片宽度在同一数量级。

讨 论

1. 切屑形成的塑性变形是借助于位错,在切削力作用下不断地增殖和运动而进行的。塑性变形的形式之一是位错沿金属中原子排列最密集的晶面和晶向运动的结果。因此,抛光的

试样可观察到滑移带, 滑移带之间的金属层未发生变形, 反映了塑性变形的不均匀性。

所谓滑移系, 是晶体中的一个滑移面和在此面上的一个滑移方向组成一个滑移系, 每个滑移系都表示金属晶体产生滑移动作的一个空间位向, 滑移系数目反映了潜在的塑性变形能力。纯铁属于体心立方晶格。滑移可在 $\{110\}$ 、 $\{112\}$ 、 $\{123\}$ 晶面沿 (111) 晶向进行, 因此其滑移带往往呈现出波浪式。

对多晶体而言, 晶体的位向、晶界、在晶界处偏聚的溶解原子和析出的第二相质点, 都不同程度地影响位错运动。晶体位向对多晶体纯铁塑性变形起主要的阻碍作用^[7], 位向使晶粒间各滑移面上的分剪切应力相差悬殊, 不可能同时发生滑移。位错在滑移面上的运动遇到晶界受阻, 滑移带不可能与相邻晶粒连接, 导致滑移带在晶界处发生中断或改变方向。多晶体各个相邻的晶粒处于互相包围的状况, 每个晶粒的变形都受到相邻晶粒的制约, 必然要求晶粒间相互配合才能保持整个金属变形的连续性, 否则难以变形或导致晶界处萌生微裂纹。

换言之, 保持多晶体塑性变形连续性, 要求开动多个滑移系才能满足。Von Mises 指出^[7], 至少需要有五个独立的滑移系发生滑移。体心立方晶体铁很容易满足这个条件, 表现出相当大的塑性。

2. 滑移带分布。切削过程中, 远离刀刃和剪切面的金属, 已出现微弱的塑性变形, 该处的滑移带比较平直互相平行, 这些地带应力较低。晶内启动基本(初始)滑移面已能适应变形要求, 该区位错已有增殖, 以适应变形量要求。金属愈向剪切区流动, 启动的滑移系也增多出现了交叉滑移。通过剪切面时发生大量的塑性变形, 因此, 滑移线的数目增加, 滑移带增宽或带间距减少。

金属通过刃前区的晶体内的滑移带发生了转动, 有的甚至是以晶粒为单位进行的(图版 II 9), 反映了每个晶粒受力方向和大小发生了变化, 也反映了晶体塑性变形中晶面发生转动。

3. 塑性变形沿着金属原子密排的面发生滑移, 但也并非均匀地发生在同一族的所有平行的密排晶面上。扫描电镜下所观察到的滑移线实际上是一个滑移带, 它由许多相互平行的滑移线组成, 如图 2 所示。

滑移线之间距离约 200 \AA , $\alpha\text{-Fe}$ 在室温下其原子间距为 2.482 \AA , 滑移线之间尚有近百个与之平行的密排面没有参与滑移。一组数目不等的滑移线组成了一个滑移带。滑移线数目增加, 滑移带变宽与变形量有关, 切屑内的变形带宽度要比未通过“剪切面”的部位为大(图版 II 9)。

纯铁滑移带之间距离约为 $1.0 \sim 8.0 \mu\text{m}$, 这与文[1, 7]结果相一致。滑移带之间无塑性变形^[7, 8], 说明塑性变形的不均匀性。

塑性变形的发生伴随着晶体的形变硬化。当剪切应力达到密排面上的临界切应力数值时, 位错在该晶面上开始启动, 沿着晶面的剪切方向运动并不断地发生了位错增殖。滑移开始阶段位错很少遇到阻碍, 滑移线相对比较平直。随着塑性变形发生晶体发生转动, 晶体出现几何硬化和位错遇到阻碍而引起的形变硬化。位错受阻出现阻塞、缠结以及出现胞状结构, 位错为克服上述阻碍将出现交叉滑移, 滑移线出现了扭折, 滑移线密度增加。

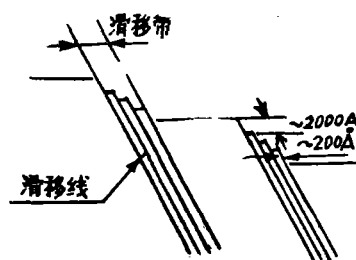


图2. 滑移带和滑移线的示意图

4. 本试验的条件下, 纯铁的层片宽度约 $30\sim 50\mu\text{m}$, 比滑移带的间距大一个数量级, 文〔4—6〕测定结果与我们在同一个数量级。

从间距测量数据和电镜照片说明:

(1) 滑移线之间和滑移带之间的晶面没有发生塑性变形。前者系超微观现象, 扫描电镜无法辨认, 滑移带之间的不变形现象可见。

(2) 层片内存在数量不等的滑移带, 说明在本试验的切削参数下, 层片内塑性变形, 最小的层片宽度也超过滑移带间距的好几倍。Black^[1, 2]对铝、铜和钢作薄片切削试验结果指出其层片宽度为 $1\sim 2\mu\text{m}$, 层片内基本无变形现象。Black 的试验结果, 层片宽度与滑移带间距同一数量级。

Ramalingam 与 Black 的资料^[2], 于 α -黄铜微切削时, 滑移带间距却小于 $1\mu\text{m}$, 层片宽度大于滑移带间距。

综上所述, 常规切削加工条件下, 层片宽度大于滑移带间距, 层片中存在数量不等的滑移带, 说明层片中有塑性变形。只有在层片宽度与滑移带间距处于同一个数量级, 层片内可认为基本不发生塑性变形。

5. 将观察过滑移带分布的纯铁试样, 按金相试样制备过程进行剪切区和切屑观察, 并测量晶粒尺寸表明, 晶粒未通过“剪切区”前为等轴形, 平均晶粒尺寸为 $50\mu\text{m}$ 。在切屑区, 晶粒与“剪切面”成一角度方向伸长, 晶粒的短轴宽度为 $25\sim 35\mu\text{m}$, 与层片宽度相当。关于层片宽度与晶界关系有待进一步研究。

结 论

1. 金属切削是材料发生塑性变形与开裂过程。运用扫描电镜观察切屑上滑移带分布, 可以观测切削过程的塑性变形。标本是用予先抛光的试样, 进行切削快速退刀获得的。

2. 切屑内滑移带间距为 $1\sim 3\mu\text{m}$, 带间基本上无塑性变形。滑移带的密度随着塑性变形的增加而增大, 形状由平直到扭曲, “剪切面”是改变滑移带数量和形状的较集中的区域。切屑塑性变形中反映了位错的运动、增殖、阻塞、缠结以至胞状结构的发展和变化。

3. 一般加工条件下(切深 0.3mm , 0.7mm), 切屑层片宽度为 $30\sim 50\mu\text{m}$, 比滑移带间距大一个数量级, 各层片内分布有数量不等的滑移带, 有力地证实了层片内存在塑性变形。

4. 一般切削条件下, 切屑变形由层片间相互变形和层片内晶内发生滑移引起的。

参 考 文 献

- [1] J.T.Black, Trans. of the ASME, Series B, Nov, (1971) 507—525
- [2] S, Ramalingam and J.T. Black, Trans. of the ASME Series B, Nov, (1972) 1215—1224.
- [3] J.T.Black, Trans. of the ASME Series B, Feb, (1972) 307—316.
- [4] 华侨大学实验资料, (1985). 英国伯明翰大学冶金材料系实验资料, (1983).
- [5] 李加种等, 浙江大学学报, 4 (1983).
- [6] 刘敬宇, 片层宽度与切屑变形, 湖南大学, (1983).
- [7] R.E. Smallman, Modern Physical Metallurgy, 2cd Edition, London, Butterworths, (1984).
- [8] 胡廣祥等, 金属学, 上海科技出版社, (1980).

A SEM Study of Chip Formation During Metal Cutting

Wu Hujzen Cai Guangren Wu Luoping Chen Ziwen

Abstract

During metal cutting, the metal plastic deformation occurred on shearing plane zone. Chip was obtained by quick stop of cutting tool from planer material of polished commercial pure iron. The surface of its lamella was observed under optical microscope and scanning electronic microscope (SEM). There are many slip lines on the surface. The number, shape and distrabution of slip lines indicate the degree and direction of plastic deformation during metal cutting and infers the behaviour of dislocation. There is a $1\sim 3\mu\text{m}$ gap of no plastic deformation between the slip bands.

The lamella is $30\sim 50\mu\text{m}$ in width, a distance ten times larger than those between slip bands.

In general machining condition ($a_p = 0.3, 0.7\text{mm}$), the deformation of chip results from deformation on neighbouring lamellas and from shear slip on crystal face within a lamella.

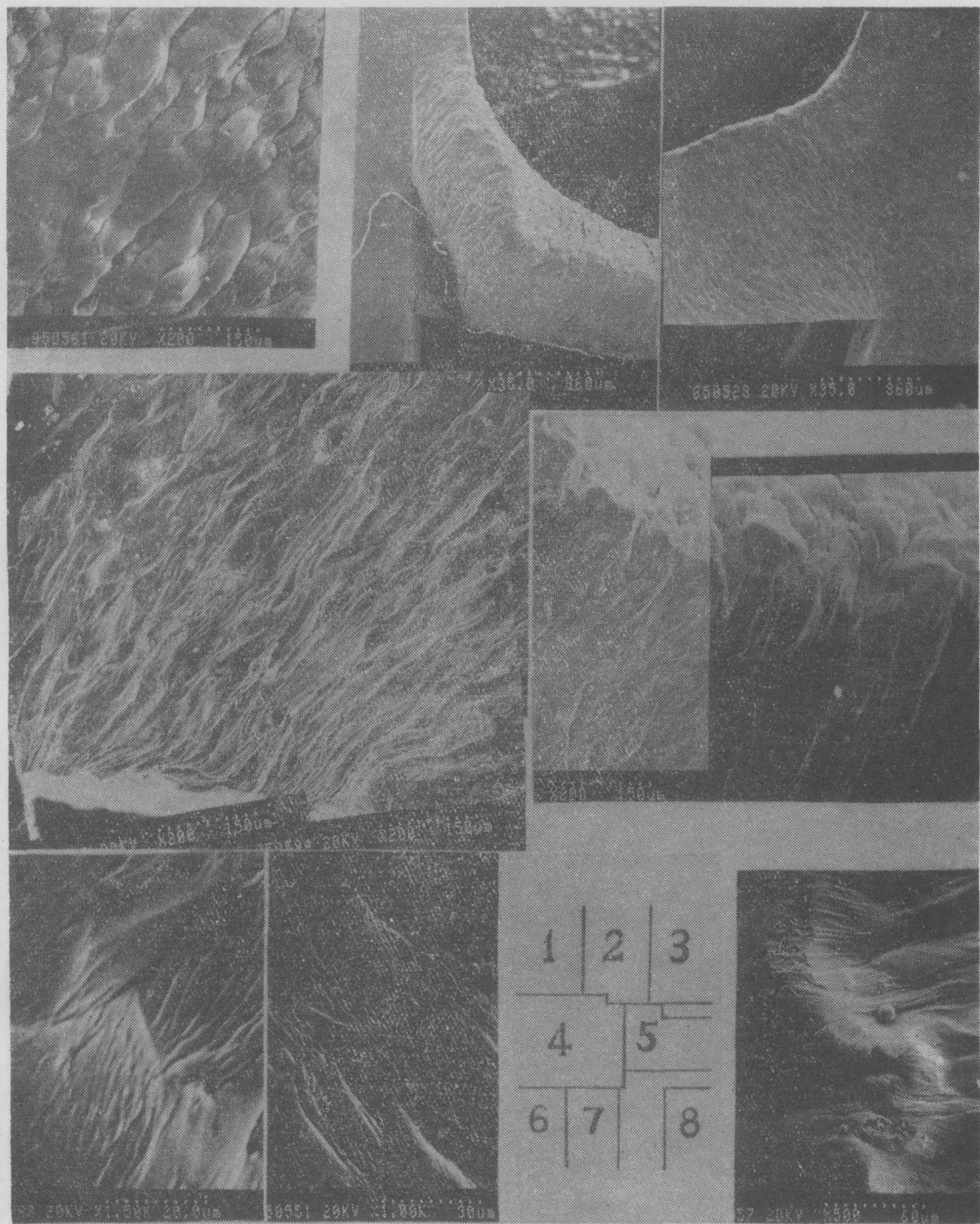


图1 切屑顶层片中滑移带分布；

图3 纯铁切屑侧面形貌 ($a_p = 0.7\text{mm}$)；

图5 切屑顶侧面交界处形貌；

图7 切屑侧面层片中滑移带的分布；

图2 纯铁切屑顶侧面形貌 ($a_p = 0.3\text{mm}$)；

图4 切屑侧面层片中滑移带的分布；

图6 切屑顶层片中滑移带的分布；

图8 切屑顶侧面滑移带的过渡



图9 剪切区上界限附近的滑移带分布； 图10 剪切区晶粒的变形（浸蚀剂：2%硝酸酒精溶液；放大倍数：50×） 图11 切屑上部的晶粒形貌（浸蚀剂：2%硝酸酒精溶液；放大倍数：320×）