https://doi.org/10.1051/jnwpu/20193761209

断裂力学在塑性金属材料切削过程中应用的研究现状

史红艳[1,2], 赵先锋[1], 王自勤[1], 姜雪婷[1], 邹子川[1], 胡小龙[1]

(1.贵州大学 机械工程学院, 贵州 贵阳 550025;
2.贵州大学 教育部现代制造技术重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘 要:剪切理论是解释切削过程的主流观点,由于切削过程的复杂性,切削过程的物理现象使用剪切理论依然很难解释和准确预测。而有些物理现象恰恰使用断裂理论能够很好地解释,因此,随着断裂理论的成熟和发展,切削过程中的断裂现象又重新引起学者的关注。为总结断裂理论在切削过程的研究成果和关注重点,详细回顾断裂理论在研究切削过程中早期的发展和目前的应用,并简要讨论了断裂理论在研究切削过程中的发展方向,认为将断裂理论和剪切理论有机融合是研究切削机理的有效途径,并提出将切削过程分为 6 个阶段进行分析,以期将断裂理论和剪切理论进行融合分析。

关 键 词:剪切理论;断裂理论;初始裂纹;剪切带;高应力区
中图分类号:TG501.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-2758(2019)06-1209-14

切削过程是大变形、大应变率、材料分离的复杂过程。目前研究切削过程有 2 种理论:①剪切理论;②断裂理论。

剪切理论最早是指 1870 年 Time 建立的正交剪切模型[1],1896 年 Zvorykin 指出剪切平面是最大剪应力平面[2],1945 年 Merchant 提出了诸多假设下的正交剪切模型[3-5],并一直沿用至今。1948 年 Piispanen 提出了卡片理论[6],1950 Hill[7] 将塑性力学应用在切削过程中,这些理论的发展奠定了剪切理论在切削领域的主流地位。随着滑移线场理论的成熟,许多学者采用滑移线场理论来分析切削过程,并建立了不同类型的滑移线场模型[8]。可以说,这些学者卓越的工作为切削技术的发展奠定了坚实的基础。

断裂理论始于 1873 年,Tresca[9-11] 认为切削过程是刀具前端的工件材料发生压缩变形的过程,因此沿着刀具的移动方向应该伴随着材料的断裂。Mallock[12] 则将切削过程描述为剪切面材料在断裂破坏后继续发生剪切变形的过程。柏林皇家技术学院的 Reuleaux[13] 在 1900 年提出金属在切削中发生断裂现象,裂纹位于刀具前面,切削过程类似于斧头劈木材的过程,即切削过程中的“斧劈”效应。Kingsbury[14] 的观察证实了这一点,他声称在刀具前面有一道裂缝。1907 年 Taylor[15] 在 ASME 的著名讲话中总结了一项为期 26 年的金属切削研究,Taylor 将切削机理描述为由撕裂形成的切屑。他的模型显示,在切削刃前裂纹的形成是沿着工件和切屑之间的分离线。在这些重要发现之后,关于金属切削的书籍和论文都采用了“在刀具前形成裂纹的切削过程,并且在切屑移动过程中修复了韧性工件材料中的裂纹”这一理论。但从 Merchant、Piispanen、Hill 等将剪切理论完善后,学术界和工业界将同期发展的断裂理论完全弃之不理,断裂理论的发展停滞不前。

虽然目前剪切理论对切削过程的研究已经取得了很多的定性成果,包括剪切角、接触长度、摩擦角、

收稿日期:2019-01-25 **基金项目**:国家自然科学基金(51765009)、贵州省科技厅-贵州大学联合基金(黔科合 LH 字[2017]7235 号)与贵州大学 2017 年度学术新苗培养及创新探索专项(黔科合平台人才[2017]5788)资助
作者简介:史红艳(1976—),女,贵州大学讲师、博士研究生,主要从事切削机理、CAD/CAE 等研究。
通信作者:赵先锋(1974—),贵州大学副教授、博士,主要从事切削仿真、刀具设计等研究。 e-mail: zxf5111@126.com

积屑瘤、切削力和切削温度等的预测,但是,目前对切削的描述依然不能全面解释切削过程中所有的物理现象,对切削过程的切削力、切削热、摩擦等还只是近似的预测,Milton 曾说过准确预测刀具的切削过程目前是无法做到的[16]。究其原因,一方面是切削过程过于复杂,诸多现象耦合在一起;另一方面还在于对切削过程的机理研究不够深入,仅用剪切理论解释切削现象还不够全面。

切削过程中的断裂理论被学术界和工业界拒绝后,1913 年 Inglis 发表了无限大板中含有一个穿透板厚的椭圆孔的弹性力学精确分析解,称为 Inglis 解[17]。但椭圆孔短轴趋于 0 时,椭圆孔变成裂纹,其尖端应力趋于无穷大,显然不符合实际情况。Griffith[18]在 1921 年提出断裂时需要将应变能的一部分转化为表面能,解决了 Inglis 解的无穷大问题。至此,开启了断裂力学的发展。1960 年左右线弹性断裂力学建立,断裂力学开始在各个领域发挥重要的作用。断裂现象一般分为 2 种类型:韧性断裂和脆性断裂。并不是韧性材料只发生韧性断裂、脆性材料只发生脆性断裂,两者往往交织在一起,在一定条件下,同一材料可以进行塑-脆转变。断裂发生时裂纹的形式一般有 3 种:张开型(Ⅰ型)、滑开型(Ⅱ型)和撕开型(Ⅲ型)。

随着实验条件的改善和断裂理论的发展,在 20 世纪末,切削过程中的断裂学说又重新引起学者的关注。在切削过程中的一些现象,比如锯齿形切屑的形成等一些物理现象使用断裂理论可以很好地解释。随着高速切削和微细切削的迅速发展,以及一些新型材料的出现,现有的剪切理论在解释切削过程时已经显得力不从心。因此,详细回顾断裂理论在切削过程中的应用,为断裂理论在新的切削条件下解释切削过程中的物理现象奠定基础。

剪切理论认为材料的断裂能很小,可以忽略不计,但随着测量手段的提高,目前认为断裂能在切削能量消耗中占有较大的比重。断裂力学的发展遵循能量守恒,正是由于表面能的引入,才促使断裂力学的发展,因此,在切削过程中,断裂能是很重要的研究方向。

1 断裂能

Viktor[19]认为目前发展更基本、更科学的切削理论的最大障碍是缺乏对在独特的切削变形条件下材料行为的理解。由于金属切削涉及切屑与工件的物理分离,因此将金属切削过程定义为工件材料的有目的性的断裂。Viktor 认为断裂处的应变是材料行为特征的基本表现。试验结果表明,增量压缩法测得的断裂应变与正交切削法测得的断裂应变一致;正交切削时工件材料的切削阻力不受切削过程中产生的高应变、应变速率和温度的影响。Atkins[20]认为传统的金属切削分析是建立在只有塑性和摩擦的基础上,并不包含断裂韧性。因此机械加工的基础理论在很多方面是存在缺陷的,Atkins 认为在切削过程中包括断裂的延性功时,可以补充目前剪切理论存在的缺陷。为了有效的分析切削过程,必须在刀具尖端采用分离准则。分离准则是延性断裂力学中采用的空隙萌生-生长-聚结的模型。分析表明,韧性材料的切削力不仅取决于塑性和摩擦,还取决于材料的断裂韧性。Atkins[21-22]进一步提出断裂能是切削能的重要组成部分,金属切削属于韧性断裂问题。将切削韧性金属的能量考虑为 3 个目的:塑性变形、刀-屑摩擦和新表面的形成。在他的模型中,使用特定的断裂功(R)来评估新表面形成过程中消耗的能量。其研究结果表明,在连续切屑加工分析中,结合表面分离的断裂能可以解释金属切削的许多特征,而传统的"塑性和摩擦"处理不能解释这些特征。Viktor 等[23]认为金属切削所消耗的功率是 4 个分量的总和:主切削刃和次切削刃去除材料的塑性变形所消耗的功率、刀具-切屑接触所消耗的功率、消耗在切削层上的功率。刀具-工件界面以及形成新表面所需的功率(内聚能)。提出了一种实用的切削力和切削功率的估算方法。讨论了切削系统中的能量分配以及切削参数对能量分配的影响。Yallamussaa[24]认为切削过程的分析需要建立一个从塑性变形、损伤萌生到最终断裂全过程的工作材料模型,建立原生变形区的应力三轴状态。其研究结果表明:加工参数对应力三轴度的影响与切削力有关。导致应力三轴度增加的参数变化降低了切削力,即降低了断裂的应变能,反之亦然,这再次说明金属切削应被看作是有目的的材料断裂。加工过程可以通过使材料向切屑转变时的塑性变形能量最小化来优化。Ueda 等[25]利用线性弹性断裂力学(LEFM)的概念,用能量释放率(G)来评价工程陶瓷微切削过程中的断裂能。Ericson 和 Lindberg[26]利用临界断裂能理论估算了聚合物中裂纹扩展过程中的能量耗散。Karpat[27]提出除了

Atkins 所考虑的能量外,还包括“犁耕”能量。他指出,当考虑到“犁耕”能量时,断裂能会大幅度降低。

Sathyan 等[28]认为断裂力学中的 J 积分包含多种断裂模式,包括材料塑性和非线性行为。因此,采用 J 积分评价 AISI 微切削过程中断裂能对尺寸效应的贡献。Iwata 和 Ueda[29]提出了一种计算 J 积分的方法,这种方法能够利用弹塑性断裂力学(EPFM)来理解韧性和脆性状态的切削。Chiu 等[30]利用应力强度因子(K_{I} 和 K_{II})预测了脆性材料切割过程中的断裂能,发现裂纹形成的 2 种模式在较长的裂纹长度下具有非线性效应。

通过对切削过程能量分析,可以认为切削过程中断裂能是不能忽略的重要能量,而剪切理论恰恰忽略了断裂能[31]。切削过程可以认为是一种有目的性的韧性断裂过程,即在切削过程中存在断裂现象。断裂现象起始于裂纹,吴惠贞等[32]认为金属切削中有 2 个部位的裂纹不可忽视,第一部位裂纹发生在离切削刃一定距离的切屑底部,该裂纹的扩展速率控制着积屑瘤的形成和稳定性;第二部位裂纹位于刀尖主要沿第一剪切面扩展,它控制了切屑的形态。根据他的描述,在切削过程中,研究断裂现象关注的 2 个部位如图 1 中的Ⅰ和Ⅱ的位置所示。

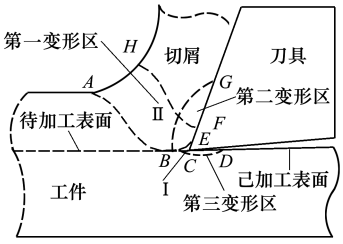


图 1　断裂现象的位置

图 1 中Ⅰ位置在刀尖前部,称为刀尖前部裂纹;Ⅱ位置在第一变形区,称为剪切带裂纹。下面分别介绍这 2 个区域断裂力学的应用情况。

2　刀尖前部裂纹

2.1　早期超前裂纹

Taylor[15]在对切削过程机理的解释中指出,当发生材料滑动时,工具会和材料发生碰撞,使材料向外流动并呈周期性。他认为“每一条滑动都是通过在切削刃前面的一个小裂纹或裂缝完成的。1948 年 Piispanen[6]提出著名的卡片模型,卡片理论是使用塑性剪切理论解释切削过程,如图 2 所示。在卡片理论中,只有当沿着 bc 平面上的应力或应变超过工件材料的断裂强度或断裂应变时,卡片才能与工件相互分离,从而形成图 2b)中的材料分离,也就是说,在刀具前端沿着切削运动必然伴随着裂纹的产生从而使卡片材料分离,每一个卡片就是一个周期。即卡片理论隐含的前提是材料的断裂理论。

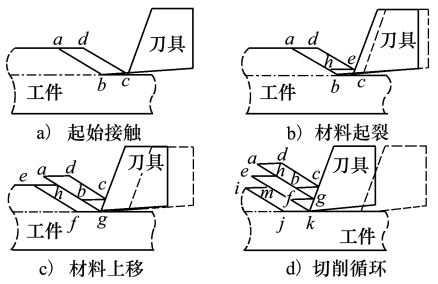


图 2　切削卡片理论示意图[6]

上述学者认为在刀具尖端的前面有一条和切削方向平行的裂纹或裂缝存在,这个裂纹也称为超前裂纹,超前裂纹的存在出现斧劈效应,斧劈效应使切削过程的切削力下降,同时在前刀面出现“月牙湾”磨损。提出超前裂纹的学者们主要通过实验来分析和观测,但是实验的可重复性较差,不是每位学者重复他们的实验条件就可以再现实验结果,因此,超前裂纹的说法并不是每位学者都承认,而当时斧劈效应也有学者提出诸多的批评。

超前裂纹的局限有如下几点:

1)由于断裂理论的不成熟,导致超前裂纹的来源无法从理论上进行说明,超前裂纹产生的判据没有成熟的理论来解释;

2)由于超前裂纹是很微小的尺度(微米级),限于当时的实验条件,超前裂纹很难观测;

3)无法解释清楚为什么超前裂纹的方向是平行于切削运动的方向;

4)无法解释锯齿形切屑的产生。

因此,同期发展的剪切理论占据了切削理论的主流,超前裂纹的断裂理论发展逐渐停滞不前。

2.2　近期断裂力学分析

随着断裂理论和观测技术手段的发展,断裂理论又逐渐被学者关注。Atkins 认为切削过程是弹塑性断裂力学的分支[33-34],Zheng[35]在分析楔形刀具稳态切削金属的过程中发现,在刀尖前部出现一个撕裂裂纹,裂纹周围有一个塑性区。如图 3 所示。

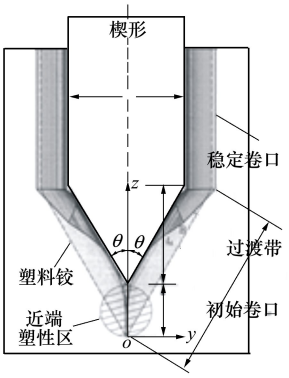


图 3 刀尖处撕裂裂纹[35]

Wyeth 等[36]用断裂力学解释了聚合物切削过程中刀具前端的断裂过程,同一材料在不同切削条件下产生不同类型的切屑是弹塑性断裂力学中固有的特性。对于 PMMA 材料,研究表明,仅通过改变切削深度即可产生全局弹性脆性层裂和塑性剪切形成的连续带。当切屑在剪切过程中形成时,测得的断裂韧性随刀具前角和剪切角的变化而变化,并提出了基于临界裂纹尖端张开位移的混合规则的模型,表达式如(1)式所示。

$$R = \sin^2\phi R_1 + \cos^2\phi R_2 \tag{1}$$

式中,ϕ 为剪切角,R_1 为拉伸断裂韧性(kJ/m^2),R_2 为剪切断裂韧性(kJ/m^2)。建立的正交切削力模型为

$$F_C = \frac{\tau_y w\gamma t + Rw}{Q_{\text{shear}}} = \frac{\tau_y wt(\gamma + Z)}{Q_{\text{shear}}}$$

$$F_T = F_C\tan(\beta - \alpha) \tag{2}$$

式中,$Q_{\text{shear}} = 1 - \dfrac{\sin\beta\sin\phi}{\cos(\beta - \alpha)\cos(\phi - \alpha)}$;$Z = \dfrac{R}{\tau_y t}$;$\gamma = \cot\phi + \tan(\phi - \alpha)$;$\beta$ 是前刀面摩擦角,α 是前角,ϕ 是剪切角,R 是断裂韧性,τ_y 是剪切屈服强度,w 是切削宽度,t 是切削深度,γ 是剪应变。

建立的切削力模型不仅考虑了剪切理论中常用的剪切角和剪应变,同时也考虑了断裂韧性的影响。

Kinloch 等[37]在分析材料剥离过程时,将黏合断裂能 G_c 作用一个重要参数,将剥离区域(切屑)建模为弹性梁,在剥离过程中,在刀具前方形成裂纹,在梁的根部产生弯曲和旋转,梁根部旋转在剥离过程中起到了很大的作用。Williams[38]给出了用锋利工具去除表面层的一般方法,其建立的模型如图 4 所示。分离层的产生被看作一个断裂过程,并用能量法加以分析。在切削过程中,要考虑刀屑接触的摩擦,材料先发生弹性变形,然后是切屑塑性弯曲。当 $\dfrac{\sigma_y^2 h}{2EG_c} < 3$ 时,发生由弹性变形向弹塑性弯曲的转变。

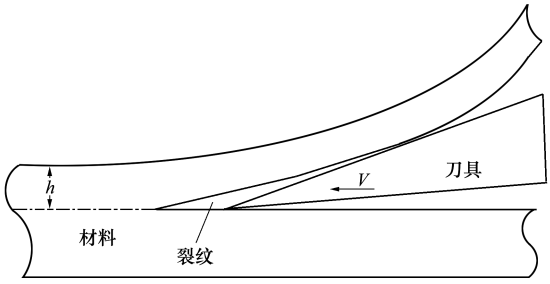


图 4 刀尖前部的裂纹[38]

Williams 等[39]利用梁试件断裂的概念分析切削加工过程。增加切削力和减小刀具前角导致一系列的切屑变形过程,从弹性弯曲到弹塑性弯曲,最后到切屑中的剪切屈服,并建立了每种变形模式的条件,在分析中包括断裂韧性以及裂纹尖端根部转动的概念。Stahle 等[40]将切削过程被看作断裂过程。分析了被压入弹性材料中的椭圆形刚性楔的情况,如图 5a)所示。如果楔尖足够钝,则断裂可作为自主过程发生,如果楔尖很锋利,则断裂可受楔形几何形状的影响。根据楔尖半径、断裂韧性和弹性模量之间的关系,讨论了楔形边缘锋利时尖端附近区域力学状态急剧变化,形成的裂纹如图 5b)至 5d)所示。

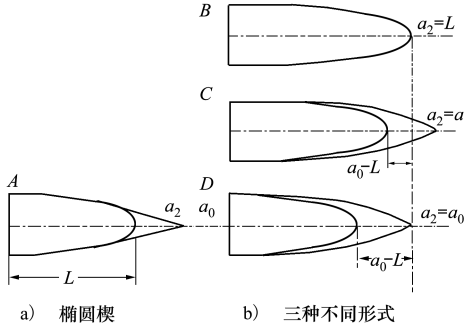


图 5 不同裂纹形貌[40]

Sathyan 等[28]采用快速停止装置开展切削实验,通过快停装置,将切屑停留在材料本体上,从而观测切削过程。通过制样,在 SEM 观测了切削过程中刀尖处存在的裂纹,如图 6 所示。从图 6 中可以

看到:在界面区的底部可以看到材料延性分离的迹象。

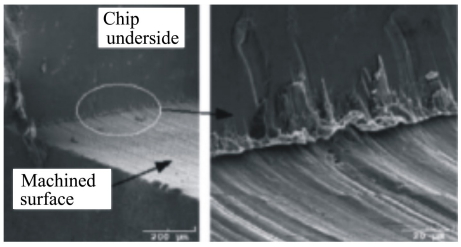


图 6　实验观测到的裂纹[28]

Liu 等[41]分析了不同切削速度对刀尖处断裂现象的影响。当切削速度为 750 m/min 时,切屑根部微观形貌如图 7 所示,可观察到大量的剪切和等轴凹坑,且尺寸较大,这应归功于材料良好的塑性。

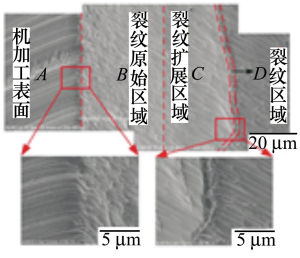


图 7　v=750 m/mim 断裂形貌[41]

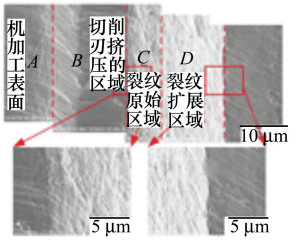


图 8　v=1 500 m/mim 断裂形貌[41]

当切削速度提高到 1 500 和 2 250 m/min 时,切屑根部微观形貌如图 8 和图 9 所示。随着尺寸和数量的减小,只能观察到剪切凹坑。

当切削速度达到 3 000 m/min 的最大值时,切屑根部微观形貌如图 10 所示。在端面上可以发现撕裂脊而不是凹陷,这意味着断裂机制开始从凹陷转变为准解理,材料的塑性随着切削速度的增加而不断降低。与应变率随切削速度的增加而增加的计算结果相比,可以推断,由于变形速度极快,在没有足够塑性变形的情况下发生断裂。

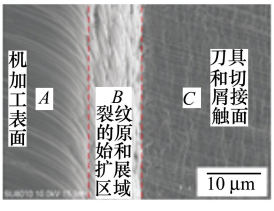


图 9　v=2 250 m/mim 断裂形貌[41]

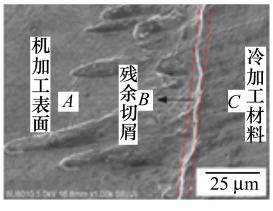


图 10　v=3 000 m/mim 断裂形貌[41]

从切屑根部可以直接观察到切屑形成过程中的断裂特征。在 750 m/min 时,变形面积较大,裂纹的产生和扩展过程,局部断裂都可以观察到,如图 7 所示的 B,C 和 D 区域。裂纹起源于纤维状,然后从根部开始扩展,最后变成剪切唇,发生断裂,这意味着材料在低切割速度下断裂前已经经历了完全塑性变形。在 1 500 m/min 时,断裂带面积明显减小,原始区和扩展区无法清晰区分,如图 8 所示的 C 和 D 区。剪切唇区的宽度明显减小,这意味着裂纹的扩展时间随着应变率的增加而减少,从而导致塑性变形。随着切削速度增加,切削速度在 2 250 m/min 时,如图 9 所示,塑性变形和断裂面积更为局部化。当切削速度提高到 3 000 m/min 时,由于大部分切屑被移走,几乎不能得到完整的切屑根部,只能观察到一些残余切屑,如图 10 所示。在断裂过程中,加工表面会出现凹痕,这意味着塑性变形逐渐渗透到加工表面,最终影响表面质量。在切屑形成过程中,当切削速度不断增加时,在没有完全塑性变形的情况下会发生断裂。随着切削速度的增加,材料的断裂特征开始由韧性向脆性转变,韧性向脆性转变的现象应归因于应变率增大引起的变形时间缩短,晶粒细化导致的硬化。

Tang 等[42]建立了正交车削切屑根部刀尖裂纹尖端场的解析模型。还提出了 I-II 混合模型中裂缝倾角 ψ 与拉应力 σ 方向和裂缝传播角 θ_0 之间的关系。推导了切屑根部裂纹动态传播的控制方程,位移函数和边界条件,其模型如图 11 所示。

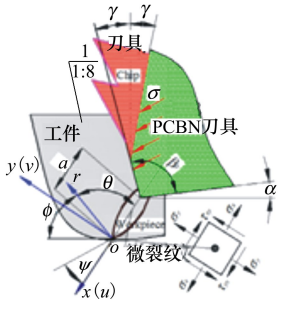


图 11　切屑根部裂纹[42]

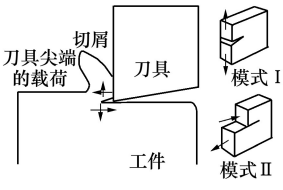


图 12　正交切削的 2 种裂纹形式[43]

在图 11 中,裂纹扩展方向与建立的笛卡尔坐标 (xoy) 中的 x 轴相同。裂纹扩展角 θ 是建立的极坐标 (r,θ) 中的极角。Ψ 是裂纹倾斜角与拉伸应力 σ 的方向;β_0 是刀具楔角;σ 是作用于裂纹边缘表面的拉伸应力;a 是裂纹的半长度。裂纹尖端的应力场

可以表示为(3) 式。

$$\sigma_x = \frac{K_{\mathrm{I}}}{\sqrt{2\pi r}}\cos\frac{\theta}{2}\left(1 - \sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}\right) - \frac{K_{\mathrm{II}}}{\sqrt{2\pi r}}\sin\frac{\theta}{2}\left(2 + \cos\frac{\theta}{2}\cos\frac{3\theta}{2}\right)$$

$$\sigma_y = \frac{K_{\mathrm{I}}}{\sqrt{2\pi r}}\cos\frac{\theta}{2}\left(1 + \sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}\right) - \frac{K_{\mathrm{II}}}{\sqrt{2\pi r}}\left(\sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\theta}{2}\cos\frac{3\theta}{2}\right)$$

$$\sigma_z = \frac{K_{\mathrm{I}}}{\sqrt{2\pi r}}\left(\cos\frac{\theta}{2}\sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}\right) - \frac{K_{\mathrm{II}}}{\sqrt{2\pi r}}\cos\frac{\theta}{2}\left(1 - \sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}\right) \quad (3)$$

式中

$$K_{\mathrm{I}} = \sigma\sqrt{\pi a}\sin^2\Psi$$

$$K_{\mathrm{II}} = \sigma\sqrt{\pi a}\sin\Psi\cos\Psi$$

Dattatraya 等[43] 认为在切削过程中可能存在 2 种裂纹:张开型和滑开型,如图 12 所示。

从目前的理论分析和实验结果可以表明,刀尖前方存在裂纹。一般认为刀尖处的裂纹是张开型(Ⅰ型)裂纹,也有学者认为同时还存在滑开型(Ⅱ型)裂纹,对两者在复合裂纹中所占比重没有详细的分析。

随着高速切削的发展以及难加工材料的应用愈来愈广泛,锯齿形切屑的出现是一种普遍现象,在刀具尖端处的裂纹无法解释锯齿状切屑的形成,因此,许多学者积极研究锯齿形切屑的形成,目前采用剪切理论对锯齿形切屑的解释是绝热剪切失稳,不能完全解释锯齿形切屑的形成,断裂理论恰恰在这个领域可以对切削过程进行解释。

3 剪切带裂纹

在脆性材料的切削时,裂纹一般从根部开裂,如图 13 所示。裂纹的扩展速度以弹性波波速前进(塑性波波速远小于弹性波波速),弹性波波速表达式为(4)式。

$$v_c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (4)$$

式中,v_c 为弹性波波速,E 为弹性模量,ρ 为材料的密度。

由于切屑的厚度很小,可以看到基本是瞬间就发生了切屑分离的现象。在脆性材料切削过程中在剪切方向有断裂现象的存在,在塑性材料切削过程中在剪切方向上是否也有像切削脆性材料一样的断裂现象存在,一直是学术界争论的重点。目前切削过程中的第一变形区剪切带的断裂提出 3 种断裂形式:表面裂纹扩展、中间裂纹扩展和根部裂纹扩展,如图 14 所示。

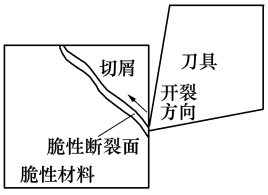


图 13 脆性材料的断裂

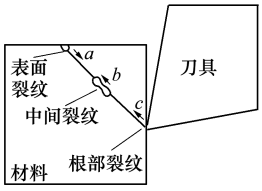


图 14 裂纹开裂

3.1 根部裂纹

Cook[44] 等认为当刀具进行切削时,由于刀具有刀尖圆角半径的存在,如图 15 所示,使 A 点以上(并在 A 点附近)的金属承受拉应力,如果此拉应力超过破坏应力就在 A 处产生裂缝,如果此裂缝没有受到抑制,就会扩张下去,直到 B 点以后,由于和切应力的方向一致,就沿切应力方向发生塑性破坏,促使形成一个单元切屑(崩碎切屑)。如果在 A 点所生的裂缝很快被抑制不再扩张,就形成带状切屑。这种观点是和超前裂纹的观点不同,因为这里所述的裂缝是周期性形成,不是像超前裂纹一样一直在刀具前方存在。

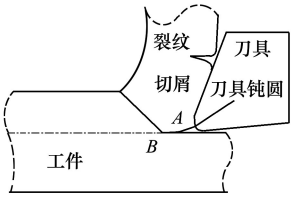


图 15 Cook 周期裂纹[44]

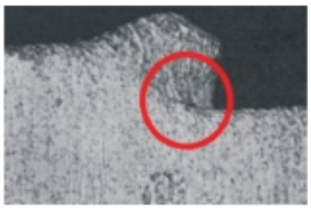


图 16 剪切面裂纹[45]

1983 年,Sampath 等[45] 在基于假定连续介质的弹塑性有限元应力场的研究中,通过实验观察黄铜的切削过程,分析切屑几何结构和切削力,但在实验中发现:在切削过程中沿着剪切面方向有一个裂纹的存在,如图 16 所示。其研究结果表明:一般金属材料不具有连续性,使用连续介质的假设并不能完全反应真是的切削过程,同时沿剪切面方向的微裂纹在切削过程中具有重要的作用。

随着观测技术的不断更新,在宏观和微观层面上加工各种各样的工件材料时,切屑形成过程中裂纹的存在被发现。Itava 等[46]和 Didjanin 等[47]对切屑的形成进行了非常详细的研究,认为只有在相对特定的切削条件下,例如当加工纯单晶铝时,才能形成连续的切屑。在通常的切削条件下,根部裂纹是切屑形成过程中的真实现象。

3.2　中心开裂

Vyas 等[48]根据实验中观察到的锯齿形切屑自由表面中的裂纹,结合切削模型,提出了周期脆性断裂理论,在他们早期提出的基于断裂机制而形成锯齿切屑的模型中,萌生出微小裂纹源的位置处于工件被加工层表面,随后该裂纹源由切屑表面向切削刃扩展约一半距离,断裂后就形成了锯齿切屑,假设裂纹源周期性出现后,就得到了连续性锯齿切屑。随着研究的深入,修正后的周期性断裂理论指出,裂纹源是切屑历经第一变形区塑性变形,在形变区中萌生出裂纹,随着剪切塑性变形的进行,裂纹逐渐扩展,最终到达切屑的自由表面,导致了锯齿形切屑的产生[49-50]。

其裂纹的形成在中心开裂,其开裂演变过程如图 17 所示。工件材料上周期性裂纹而形成锯齿切屑的过程:在刀具作用下,在第一变形区形成萌生裂纹(见图 17a)),随着切削的进行,第一变形区进一步塑性变形导致裂纹的扩展,到达切屑自由表面(见图 17b)),由于第二变形区发生了部分断裂,由此使得切屑不再完整连续,成为锯齿状,刀具进一步向前运动,第一变形区发生转动,在不连续的下一个新区域上有形成新的裂纹源(见图 17c)),随后重复图 17a)和图 17c)中的过程,得到图 17d)所示的第二错齿。由此可见该锯齿切屑形成机制的核心是用裂纹源的萌生和发展,以及切屑表面最终发生的部分断裂现象“代替”解释绝热剪切理论中对第一变形区的软化,而对于刀具作用工件引起的第一变形区“转动”,导致切屑成形的非连续过程出现,未进行合理的解释[51]。



图 17　中心开裂形成锯齿状切屑示意图[49-50]

中心裂纹的产生来源于拉伸开裂和压缩开裂。对于棒材,进行拉伸实验时,由于芯部受到三向压应力,在芯部裂纹萌生、成核、扩展并最终断裂,其演变过程如图 18 至图 20 所示。在杆(板、块)压缩(拉伸)时,在内部形成 3 个应力区,Ⅰ区和Ⅱ区均是三向压应力区,Ⅰ区是停滞区,Ⅲ区是二向应力区,因此,在杆(板、块)的内部Ⅱ区首先开裂而后延伸到表面。中心裂纹理论认为切屑受到压应力而促使裂纹形成,而后向两边扩展,但由于在刀屑接触面有压应力和摩擦力形成的剪应力相互作用,抑制裂纹扩展,因此,裂纹只向自由表面扩展,而不向刀屑接触面扩展,应力小则锯齿化不明显,应力大则锯齿化明显。实验表明:由于切削速度的增大(前角的变小),应力变大,形成的切屑锯齿化严重[52]。

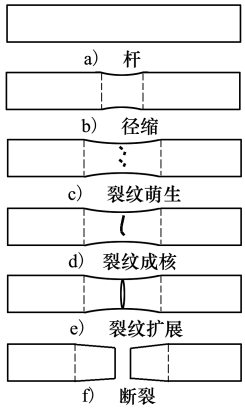


图 18　杆拉伸断裂示意图[53]

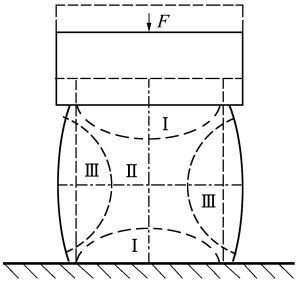


图 19　块压缩 3 个应力区[53]



图 20　压溃实验[53]

中心开裂形成锯齿形切屑,虽然从力学上说和杆拉伸、压缩类似,但是其受力比杆拉伸和压缩更为复杂,简单的采用拉伸和压缩来类比切削过程,并不能解释切削的本质。中心开裂可以解释锯齿切屑的形成,但不能解释锯齿裂纹的扩展和演变,不能完全说明裂纹为什么只向自由表面扩展,而不向刀-屑接触面扩展,以及中心裂纹位置的变化规律。

因此,许多学者认为剪切区的开裂不是从中间开裂,而是从自由表面开裂,并对锯齿形切屑进行深入的研究。

3.3 自由表面开裂

Klöpper[54]在研究球墨铸铁的切削性能时,提出和中心开裂及根部开裂不同的观点—自由表面开裂。在所考虑的锯齿切屑形成的情况下,在第一次接触和剪切引发之后,沿着剪切区运行的自由表面上产生裂纹。停滞区域消失,切屑段开始从切削刃急剧滑动。由于裂纹的扩展,切屑与基材之间的支撑截面变小。剪切角变大,使得切屑段被进一步推出切屑根部区域。从临界剪切角度出发,原始剪切区崩塌并分裂:一部分随着切屑在前刀面上平移;另一部分则从切削刃下方压缩之后形成加工表面,并且切削过程周期重复。表面开裂演变过程如图 21 所示,图 22 是实验和仿真分析的结果对比。



图 21 表面开裂[54]

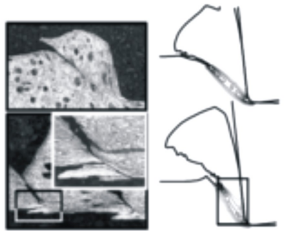


图 22 分析和实验对比[54]

庆振华[55]认为绝热剪切带形成于刀尖附近,在切削过程中向材料内部扩展,锯齿形切屑的裂纹源起始于工件自由表面,在切屑形成过程中向材料内部扩展。最终导致切屑分离的因素是裂纹的扩展。Gu 等[56]在经过实验观测后认为,在切削过程中随着刀具向前移动,锯齿状切屑变形带中形成裂纹并开始扩展。直至形成崩碎切屑。其裂纹形状如图 23 所示。王兵等[57-58]分析了锯齿状切屑断裂轨迹的演化规律,根据锯齿状切屑形成特点提出绝热剪切-韧性断裂复合型切屑形成模型,针对金属材料在高应变加载下的塑脆转变机制,提出碎断切屑的形成是由脆性断裂所致。提出切削速度提高时拉伸应力区的扩大是导致锯齿状切屑内绝热剪切带裂纹扩展加剧和切屑锯齿化程度提高的本质控制因素。

Jian 等[59]在锯齿切屑的波谷也发现了裂纹,如图 24 所示,他认为裂纹长度和切削速度正相关。Su 等[60]针对蠕墨铸铁开展切削研究,切削速度和进给速度均影响锯齿形尺寸。锯齿形切屑上没有绝热剪切区,锯齿形切屑侧表面上部有脆性断裂面,而下部

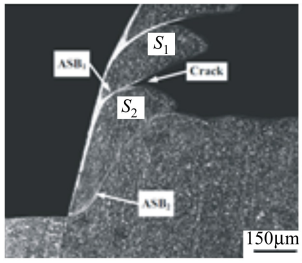


图 23 切屑的开裂[56]

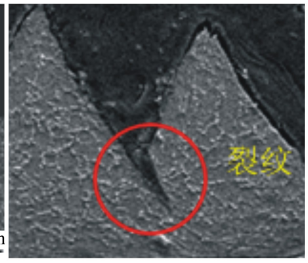


图 24 波谷处裂纹[59]

有塑性断裂面。Su 认为利用周期性脆性断裂理论可以解释蠕墨铸铁铣削过程中锯齿状切屑的形成机理。

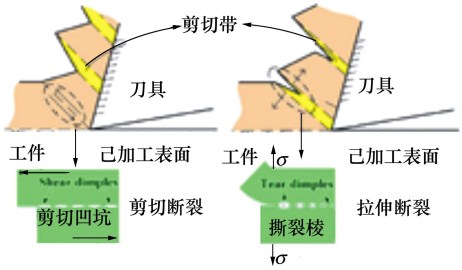


图 25 断裂机理[61]

Liu 等[61]分析切屑分段间的断裂机理,揭示了切削力变化的关系以及锯齿状切屑的形成机理。当切削速度从 125 提高到 250 m/min 时,断裂特征从剪切断裂转变为拉伸撕裂,同时切削力和切屑锯齿度开始下降,如图 25 所示。当切削速度继续提高时,剪切应力卸载水平和绝热剪切带演化程度增加,剪切断裂特征占主导地位,拉伸断裂不明显,导致切削力和锯齿度降低。当切削速度提高到 375 m/min 和 500 m/min 时,会产生再结晶等轴纳米晶粒,晶粒性能表现为各向同性,剪切断裂占主导地位。同时,在热软化作用下,剪切带的切削力随着硬度的降低而减小。

Elbestawi 等[62]认为由于工件待加工表面不是绝对光滑的,而是由微观的隆起、裂纹及空穴等组成的具有瑕疵的粗糙表面,由于表层材料的脆性,材料裂纹源将在此位置发生。

王敏杰等[63]认为锯齿形切屑形成过程中会不可避免地发生绝热剪切局部化断裂,根据剪切带内能量变化规律,结合梯度塑性理论,建立高速切削过程热塑性剪切波的传播模型,推导绝热剪切饱和极限及饱和度的表达式,提出当绝热剪切饱和度 D_{ASB} >1 时发生断裂。其表达式如(5)式所示。

$$D_{\mathrm{ASB}}=\frac{G_{\mathrm{ASB}}}{G_{\mathrm{ASB}}^{f}} \tag{5}$$

从目前的实验现象来看,切屑制样后在锯齿状切屑的波谷有材料开裂现象,不同的加工条件,波谷的开裂程度不同,最终也可以形成崩碎切屑。

目前在剪切带形成的 3 种断裂形式明显存在争议,由于假设的理论前提不同,其结果必然会有不同的解读和判断。对第一变形区剪切带的断裂现象,3 种理论均具有一定的合理性。对锯齿状切屑的形成,自由表面断裂和实验结果更符合更直观。但由于目前的研究是针对第一变形区剪切带断裂现象的研究,主要是研究表象问题,更多的是分析切屑的形貌和材料组织变化,没有从力学上进行计算和分析。同时由于实验条件的复杂性,3 种理论的断裂现象也都可以观测到,因此,还无法断定那种理论一定正确。

4　讨　论

4.1　断裂现象的研究现状

通过对目前对切削过程中断裂现象的分析,总结如下:

1) 在切削过程中,考虑能量平衡,断裂能是必须考虑的能量。金属切削过程应被看作是弹性变形、塑性变形、损伤萌生到最终断裂的过程,是一种有目的性的材料断裂行为。断裂行为是空隙萌生-生长-聚结的演变过程。

2) 初始裂纹出现在刀具钝圆前部和第一变形区剪切带 2 个部位。刀具钝圆前部区断裂分析主要以张开型(Ⅰ型)为主,同时认为滑开型(Ⅱ型)裂纹也可能存在。

3) 第一变形区的断裂现象有 3 种理论:根部开裂,中间开裂,表面开裂。其中锯齿形切屑的形成一般认为是周期断裂形成,有中部开裂和表面开裂两种理论来解释锯齿状裂纹的产生。

4) 裂纹扩展的判据有 J 积分、K_c、G_c、COD 等方法,目前对切削过程中裂纹的扩展临界条件没有统一的判据。

目前研究的不足:

1) 初始裂纹的产生和裂纹的方向性还没有具体说明,目前初始裂纹的出现具有随机性和偶然性。

2) 在刀具钝圆前部的裂纹,虽然认为滑开型(Ⅱ型)裂纹也可能存在,但目前没有深入分析滑开型(Ⅱ型)裂纹,对于一般的非正交切削(车削、铣削),撕开型裂纹(Ⅲ型)可能更适合来说明切削过程。在实际的切削过程中,单一的某种裂纹可能不足以完全解释切削过程中的断裂现象,需要将这几种裂纹形式综合考虑进行分析。

3) 大多数学者都认为仅用剪切理论或断裂理论不能完整解释切削过程,需要将两者结合起来研究,但目前还无法有机的融合 2 种理论[64]。

4.2　断裂理论与剪切理论的融合

目前对于断裂的研究,认为是刀具刀尖前区域的微裂纹扩展而形成张开型裂纹,然后裂纹生长扩展促使材料断裂,刀尖前区域裂纹的出现,对于降低切削力有重要的作用。但目前的分析对于裂纹从无到有的过程没有定量化分析,对于切削过程而言,裂纹的产生不是随机事件,是在一定条件的控制下产生,对于大尺度工件,微裂纹的扩展具有一定的方向性,但对于小尺度的切屑而言,如果用随机微裂纹受力萌生—生长—聚结的演变过程来解释切削现象,必定是随机出现裂纹,裂纹的方向也是随机的,而切削过程的裂纹具有一定的方向性,因此,采用随机分布的微裂纹来解释开裂现象显然不具有足够的说服力。

作者认为在切削过程中,在刀具钝圆和前刀面存在内摩擦区,内摩擦区出现“滞留区”或“死区”,此区域的正应力很大,高达几个 GPa,剪应力为剪切屈服极限。在一定条件下(中速中温),会形成积屑瘤。不管切削条件是否形成积屑瘤(中速中温),此区域的高应力始终存在,因此可以将此高应力区视为一个“楔形”,如图 26 所示。

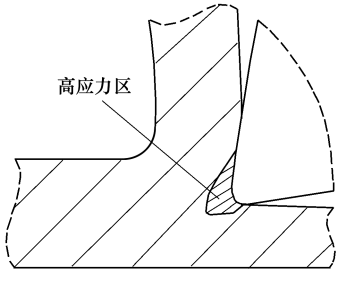


图 26　高应力区视为初始裂纹

在正交切削中,将此视为初始裂纹,“楔形”的尖端是材料的分流点;“楔形”的上下边界和本体材料形成滑开型(Ⅱ型)裂纹,“楔形”的整体可视为张开型(Ⅰ型)裂纹。“楔形”的高度和长度是张开型裂纹的尺度,就可以很好地将切削过程的起裂作为

可控的因素来分析,利用裂纹的起裂判据(J 积分、G_c、K_c、COD 等),来分析裂纹的扩展。而高应力区"楔形"的分析则可采用滑移线场理论依据接触条件而建立,从而将剪切理论和断裂理论联合起来进行协同分析。

由于切削过程的复杂性,应将切削过程进行详细的分段,构建每个阶段的力学模型,从力学基本理论出发,特别注意刀具钝圆在切削过程中的影响,分析各个阶段的特征。各个阶段如下:

1) 弹性变形阶段:刀具钝圆与工件接触,在工件表面形成接触区,随着刀具的进给运动,材料的弹性变形逐渐变大。刀具钝圆的接触区也逐渐变大。此阶段存在冲击现象。

2) 塑性变形阶段:刀具不断深入工件,达到材料的塑性变形阶段,刀具钝圆的前端接触区形成滑移线场,随着刀具的进给运动,滑移线场区域逐渐变大,同时塑性区域和弹性区域形成明显的边界。在此阶段,弹塑性变形共存。

3) 初始开裂阶段:随着弹塑区域边界的形成,由于两区域的速度差,两区域产生的位移差不断增加,到达临界点后产生剪切断裂,即Ⅱ型裂纹。裂纹是滑移线场的边界,不是平直线。此阶段的现象有滞留层、积屑瘤、死区、分流点等。产生剪切断裂后,由于塑性区的高强高硬等特性,随着进给运动,上边界以上的材料将会向上产生一个弹性恢复,下边界以下的材料将会向下产生一个弹性恢复,促使塑性区的"楔形"形成初始张开裂纹(Ⅰ型裂纹)。

4) 不稳定开裂与剪切阶段:初始裂纹形成后,随着刀具的进给运动,切屑开始接触前刀面,前刀面的剪切作用开始起作用,同时,由于初始张开裂纹的出现,切屑可以作为梁(板)来开展力学分析,随着断裂现象和摩擦的出现,大量的热能释放出来,同时在梁(板)的根部,不断累积能量,如果不形成塑性铰,则形成的是连续切屑,如果形成塑性铰,则形成锯齿形切屑,如果应变率过大,则会出现崩碎切屑。在此阶段开裂和剪切都处于不稳定状态。

5) 稳定开裂与剪切阶段:随着进给运动,热平衡的构建,材料的软化作用出现,切削过程不断重复开裂、挤压、剪切的过程,形成稳定的切削过程。

6) 切出阶段:在切出过程,由于张开裂纹、切屑梁(板))模型的综合作用,在切出阶段,材料的支撑作用减弱,弹性变形增大,会出现飞边、毛刺和加工面的缺口等现象。在一定条件下,此阶段存在断裂行为。

上述阶段在特定切削过程中不一定全部出现。通过构建切削过程的不同阶段,将断裂、剪切、高速下的冲击、微细条件下的犁耕、热软化和硬化等情况综合考虑,才能构建完整的切削过程模型。为指导刀具设计、优化工艺参数、提高表面质量提供理论依据。

5 结 论

目前切削过程中断裂现象的研究文献还较少,只有少数学者在这个领域进行研究。断裂理论可以很好地解释锯齿形切屑的形成和发展,是对剪切理论的有益补充,但是目前还没有在断裂理论下建立锯齿形切屑的形成判据。对于刀尖前端的裂纹,其尺度很小(微米级),同时由于金属材料在高温高压的塑性流动,在刀尖附近形成宏观的清晰可见裂纹是很难的,只有在微观下,才可以观测到断裂现象的存在。由于切削过程的复杂性导致了仅用一种理论(剪切或断裂)来解释切削过程是难以胜任的,因此,将断裂理论和剪切理论有机结合,从力学本质来解释切削过程,才能更好地预测切削结果。将高应力区视为初始裂纹可以很好地将断裂力学和剪切理论结合在一起,可以从新的角度来解释切削过程。同时为高速切削、微细切削等极端条件的切削过程分析提供理论支撑。本文提出的切削过程六阶段,还有待深入的理论分析和实验验证,还需要不断地补充和完善,以期为刀具设计、工艺优化奠定理论基础。目前切削过程的断裂现象的研究还不够深入,还需要大量的学者积极开拓这一领域。

参考文献:

[1] TIME I. Resistance of Metals and Wood to Cutting[M]. St Petersbourg, Russia, Dermacow Press House,1870

[2] ZVORYKIN K A, RABOTA I U. Neobkhodimyye Diya Otdeleniya Metallicheskoi Struzhki[J]. Teknickeskii Sbornik i Vesnik Promyshlennosti, 1896,123: 57-96

[3] ERNST H, MERCHANT M E. Chip Formation, Friction and High Uality Machined Surfaces[J]. Surface Treatment of Metals, 1941, 29(9): 299-378

[4] MERCHANT M E. Mechanics of the Metal Cutting Process Ⅰ. Orthogonal Cutting and a Type-2 Chips[J]. Journal of Applied Physics, 1945,16(5): 267-275

[5] MERCHANT M E. Mechanics of the Metal Cutting Process Ⅱ. Plasticity Conditions in Orthogonal Cutting[J]. Journal of Applied Physics, 1945,16(5): 318-324

[6] PIISPANEN V. Theory of Formation of Metal Chips[J]. Journal of Applied Physics, 1948,19(10): 876-881

[7] HILL R. The Mathematical Theory of Plasticity[M]. London, Oxford University Press, 1950

[8] 史红艳,赵先锋,姜雪婷. 滑移线场理论在正交切削过程中的研究现状[J]. 华南理工大学学报,2019,47(1): 14-31
SHI Hongyan, ZHAO Xianfeng, JIANG Xueting. Current Research on the Application of Slip Line Field Theory in the Orthogonal Cutting Process[J]. Journal of South China University of Technology, 2019,47(1): 14-31 (in Chinese)

[9] TRESCA H. Further Applications of the Flow of Solids[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1978, 30: 301-345

[10] TRESCA H. MéMores Sur Le Rabotage Des MéTaux[J].Bulletin De LasociéTé′ Encouragement Pour L′Industrienationale, 1873, 15:585-685

[11] UDAY Shankerdixit, MANJURI Hazarika, DAVIM J Paulo. A Brief History of Mechanical Engineering[M]. Berlin: Sporinger International Publishing, 2017

[12] MALLOCK A. The Action of Cutting Tools[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1881,33:127-139

[13] REULEAUX F. Über Den Taylor Whiteschen Werkzeugstah[J]. Verein Sur Berforderung Des Gewerbefleissen in Preussen Sitzungsberichete, 1900,79: 179-220

[14] KINGSBURY. Report of the Present Status and Future Problems in the Art of Cutting and Forming Metals[J]. ASME Committee Report, 1924(46): 20-30

[15] TAYLOR F W. On the Art of Cutting Metals[J]. Transactions of ASME, 1907, 28: 31-35

[16] MILTON C S. Metal Cutting Principles Second Edition[M]. New York, Oxford: Oxford University Press,2005

[17] INGLIS C E. Stress in a Plate Due to the Presence of Cracks and Sharp Corners[J]. Trans Roy Inst Naval Arch, 1913, 66: 219-230

[18] GRIFFITH A A. The Phenomena of Rupture and Flow in Solid[J]. Philosophical Transaction of Royal Society of London, 1921, A221:163-197

[19] VIKTOR P A. A Treatise on Material Characterization in the Metal Cutting Process. Part 1: a Novel Approach and Experimental Verification[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 96: 22-33

[20] ATKINS A G. Toughness and Cutting: a New Way of Simultaneously Determining Ductile Fracture Toughness and Strength[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2005, 72: 849-860

[21] ATKINS A G. Modeling Metal Cutting Using Modern Ductile Fracture Mechanics: Quantitative Explanations for Some Longstanding Problems[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2003, 45: 373-396

[22] ATKINS A G. Fracture Toughness and Cutting[J]. International Journal of Production Research, 1974, 12(2): 263-274

[23] VIKTOR P A, XIAO Xinran. A Methodology for Practical Cutting Force Evaluation Based on the Energy Spent in the Cutting System[J]. Machining Science and Technology, 2008, 12(3): 325-347

[24] YALLAMUSSAA Bushawashi. Modeling of Metal Cutting as Purposeful Fracture of Work Material[D]. Lansin: Michigan State University, 2013

[25] UEDA K, SUGITA T, TSUWA H. Application of Fracture Mechanics in Micro-Cutting of Engineering Ceramics[J]. Ann CIRP, 1983, 32(1): 83-86

[26] ERICSON M L, LINDBERG H. A Method of Measuring Energy Dissipation during Crack Propagation in Polymers with an Instrumented Ultramicrotome[J]. Journal of Materials Science, 1996, 31(3): 655-662

[27] KARPAT Y. Investigation of the Effect of Cutting Tool Edge Radius on Material Separation Due to Ductile Fracture in Machining [J]. Int J Mech Sci, 2009, 51(7): 541-546

[28] SATHYAN Subbiah, SHREYES N M. Effect of Finite Edge Radius on Ductile Fracture Ahead of the Cutting Tool Edge in Micro-Cutting of Al2024-T3[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 474: 283-300

[29] IWATA K, UEDA K. A J-Integral Approach to Material Removal Mechanisms in Micro Cutting of Ceramics[J]. ANN CIRP, 1991,40(1): 61-64

[30] CHIU W C, ENDRES W J, THOULESS M D. An Analysis of Surface Cracking during Orthogonal Machining of Glass[J]. Machining Science and Technology, 2001, 5(2): 195-215

[31] Finnie I. Review of the Metal Cutting Theories of the Past Hundred Years[J]. Mechanical Engineering, 1956,78: 715-721

[32] 吴惠贞,陈子文. 钢的切屑变形和断裂[J]. 华侨大学学报, 1993, 14(4): 477-482
WU Huizhen, CHEN Ziwen. Chip Deformation and Fracture of Steel[J]. Journal of Huaqiao University, 1993, 14(4): 477-482 (in Chinese)

[33] ATKINS Tony. The Science and Engineering of Cutting[M]. Netherlands: Elsevier,2009

[34] ATKINS Tony. The Science and Engineering of Cutting: the Mechanics and Process of Spavating, Scratching and Puncturing Biomaterials, Metals and Non-Metals[M]. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2009

[35] ZHENG Z M, WIERZBICKI T. A Theoretical Study of Steady-State Wedge Cutting through Metal Plates[J]. International Journal of Fracture, 1996, 78(1): 45-66

[36] WYETH D J, ATKINS A G. Mixed Mode Fracture Toughness as a Separation Parameter When Cutting Polymers[J]. Engineering Fracture Mechanics,2009,76: 2690-2697

[37] KINLOCH A J, LAU C C, WILLIAMS J G. The Peeling of Flexible Laminates[J]. International Journal of Fracture,1994,66: 45-70

[38] WILLIAMS J G. The Fracture Mechanics of Surface Layer Removal[J]. International of Journal Fracture, 2011, 170: 37-48

[39] WILLIAMS J G, PATEL Y, BLACKMAN B R K. A Fracture Mechanics Analysis of Cutting and Machining[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2010,77: 293-308

[40] STAHLE P, SPAGNOLI A, TERZANO M. On the Fracture Processes of Cutting[J]. Procedia Structural Integrity, 2017,3: 468-476

[41] LIU Hongguang, ZHANG Jun, XU Xiang, et al. Effect of Microstructure Evolution on Chip Formation and Fracture during High-Speed Cutting of Single Phase Metals[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(1/2/3/4): 823-833

[42] TANG Linhu, GAO Chengxiu, SHEN Hao, et al. Mechanism of the Crack Propagation in the Chip Root in Dry Hard Orthogonal Turning of the Hardened Steel[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 138/139: 272-281

[43] DATTATRAYA Parle, RAMESH K S, SUHAS S J. Fracture Energy Evaluation Using J-Integral in Orthogonal Micro cutting[J]. Journal of Micro-and Nano-Manufacturing, 2016(4): 1-9

[44] COOK N H, FINNIE I, SHAW M C. Discontinuous Chip Formation[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1954, 76(2): 153-162

[45] SAMPATH W S, SHAW M S. Fracture on the Shear Plane in Continuous Cutting[J]. Manufacturing Engineering Transations, 1983(17): 17281-17285

[46] ITAVA K, UEDA K. The Significance of the Dynamic Crack Behavior in Chip Formation[J]. Annals of the CIRP, 1976, 25: 65-70

[47] DIDJANIN L, KOVAC P. Fracture Mechanisms in Chip Formation Processes[J]. Materials Science and Technology, 1997, 13: 439-444

[48] VYAS A, SHAW M C. Mechanics of Saw-Tooth Chip Formation in Metal Cutting[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering Transation of the ASME, 1999, 121: 163-172

[49] DONG G, ZHAOPENG H, RONGDI H, et al. Study of Cutting Deformation in Machining Nickel-Based Alloy Inconel 718[J]. International Journal of Machine Tools and anufacture, 2011, 51(6): 520-527

[50] CUI X, ZHAO B, JIAO F, et al. Chip Formation and Its Effects on Cutting Force, Tool Temperature, Tool Stress, and Cutting Edge Wear in High-and Ultra-High-Speed Milling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015: 1-11

[51] 蒲春雷. 基于材料动态再结晶形为的高速切削机理研究[D]. 北京:北京科技大学, 2015
PU Chunlei. Research on High-Speed Cutting Mechanism Based on Material Dynamic Recrystallization Shape[D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2015 (in Chinese)

[52] 段春争,王肇喜,李红华. 高速切削锯齿形切屑形成过程的有限元模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报,2014,35(2):226-232
DUAN Chunzheng, WANG Zhaoxi, LI Honghua. Finite Element Simulation of Sawtooth Chip Formation Process in High Speed Cutting[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(2): 226-232 (in Chinese)

[53] Andrew Y C. Nee Handbook of Manufacturing Engineering and Technology[M]. London: Springer, 2014

[54] KLÖPPER C. Untersuchungen Zur Zerspanbarkeit Von Austenitisch-Ferritischem Gusseisen Mit Kugelgraphit (ADI)[D]. Aachen University, 2007

[55] 庆振华. 高强度钢 42Cr Mo 硬态切削切屑形成机理的研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2015
QING Zhenhua. Study on the Formation Mechanism of 42Cr Mo Hard Cutting Chips in High Strength Steel [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015 (in Chinese)

[56] GU Liyao, WANG Minjie, CHEN Hui, et al. Experimental Study on the Process of Adiabatic Shear Fracture in Isolated Segment Formation in High-Speed Machining of Hardened Steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(1/2/3/4): 671-679

[57] 王兵. 高速切削时材料变形及断裂行为对切屑形成的影响机理研究[D]. 山东:山东大学, 2016
WANG Bing. Study on the Influence Mechanism of Material Deformation and Fracture Behavior on Chip forMation during High Speed Cutting[D]. Shandong: Shandong University, 2016 (in Chinese)

[58] WANG B, LIU Z Q, SU G S, et al. Brittle Removal Mechanism of Ductile Materials with Ultrahigh-Speed Machining[J]. Journal of Manufacture Science and Engineering, 2015, 137(6): 061002

[59] JIAN Zang, JUN Zhao, ANHAI Li, et al. Serrated Chip Formation Mechanism Analysis for Machining of Titanium Alloy Ti-6Al-4V Based on Thermal Property[J]. International Journal Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98: 119-127

[60] SU Rui, HUANG Chuanzhen, XU Longhua. Research on the Serrated Chip in the Milling of Compacted Graphite Iron by Cemented Carbide Tool[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2018, 99: 1687-1698

[61] LIU Hongguang, ZHANG Jun, XU Xiang, et al. Experimental Study on Fracture Mechanism Transformation in Chips Egmentation of Ti-6Al-4V Alloys during High-Speed Machining[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 257: 132-140

[62] ELBESTAWI M A, SRIVASTAVA A K, EL-WARDANY T I. A Model for Chip Formation during Machining of Hardened Steel [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1996, 45(1): 71-76

[63] 王敏杰, 谷丽瑶. 高速切削过程绝热剪切局部化断裂判据[J]. 机械工程学报, 2013, 49(1):156-163
WANG Minjie, GU Liyao. Adiabatic Shear Localized Fracture Criterion in High Speed Cutting Process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(1): 156-163 (in Chinese)

[64] 叶贵根,薛世峰,仝兴华,等. 金属正交切削模型研究进展[J]. 机械强度, 2012,34(4):531-544
YE Guigen, XUE Shifeng, TONG Xinghua, et al. Advances in Orthogonal Cutting Models[J]. Journal of Mechanical Strength, 2012,34(4): 531-544 (in Chinese)

Research of Fracture Mechanics Applied in the Cutting Process of Plastic Metals

SHI Hongyan[1,2], ZHAO Xianfeng[1], WANG Ziqin[1], JIANG Xueting[1], ZOU Zichuan[1], HU Xiaolong[1]

(1.College of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;
2.Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology of the Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Shear theory is the mainstream view to explain the cutting process. Because of the complexity of the cutting process, it is still difficult to explain and predict the physical phenomena in the cutting process accurately by shear theory. While some physical phenomena can be well explained by fracture theory. At the same time, with the development of fracture theory, fracture phenomenon in cutting process has attracted scholarsattention again. Therefore, the early development and current application of fracture theory in the study of cutting process are reviewed in detail. The research results and key points of fracture theory in cutting process are summarized. The development direction of fracture theory in the cutting process is briefly discussed. It is considered that the integration of fracture theory and shear theory is an effective way to study cutting mechanism, and the cutting process is divided into six stages in order to integrate fracture and shear theory.

Keywords: shear theory; fracture theory; initial crack; shear band; high stress zone

© 2019 Journal of Northwestern Polytechnical University.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.