DOI: 10.3901/JME.2020.03.223

微切削条件下典型玻璃态合金 $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ 切削特性及其切屑生成机理研究

何耿煌^{1,2} 李凌祥^{1,2} 刘献礼² 姜 涛¹ 邹建平¹

(1. 厦门金鹭特种合金有限公司 厦门 361006;

2. 哈尔滨理工大学“高效切削及刀具”国家地方联合工程重点实验室 哈尔滨 150080)

摘要: 玻璃态合金是一种内部原子排列不存在长程有序的合金, 由于具备高强度、耐腐蚀性以及优良的磁性而受到广泛应用。采用数值仿真结合引入绝热模型的研究方法对典型玻璃态合金 $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ 切削过程的变形状态和切屑生成两方面进行分析, 结果表明切削过程中初始绝热变形和周期性载荷促使切削区域形成局部剪切带而产生片层状切屑。采用微型 PCD 刀具在微切削条件下进行切削试验, 借助无线测力系统采集切削过程中的载荷作用情况, 并通过高速摄影机监测刀具工作状态。拾取切削过程中微型切屑样品, 借助 SEM 观测分析切屑的亚微观形貌特征, 试验结果与数值仿真结果相近, 从而揭示微切削条件下玻璃态合金的切削特性及切屑形成机理。研究数据可为微型刀具的开发提供借鉴。

关键词: 玻璃态合金; 片状切屑; PCD 刀具; 微切削; 绝热模型

中图分类号: TG501

Study on the Cutting Characteristics and Chip Formation Mechanism of Typical Amorphous Alloy $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ under Micro Cutting Conditions

HE Genghuang^{1,2} LI Lingxiang^{1,2} LIU Xianli² JIANG Tao¹ ZOU Jianping¹

(1. Xiamen Golden Egret Special Alloy Co., Ltd., Xiamen 361006;

2. The Key Lab of National and Local United Engineering for “High-Efficiency Cutting & Tools”, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080)

Abstract: Amorphous alloy is a metal alloy with irregular internal arrangement of atoms. It is widely used due to its high strength, toughness corrosion resistance, and excellent magnetic properties. At first, the state of deformation and chip formation are analyzed with the methods of numerical simulation combined with the introduction of adiabatic model during the cutting process of typical amorphous alloy $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$. The result show that the initial adiabatic deformation and cyclic loading in the cutting process lead to the formation of local shear bands in the cutting area and product the lamellar chips. Then, the micro PCD tool is used for cutting experiments under micro-cutting conditions. The load function in the cutting process is collected by means of the wireless measuring system. Moreover, the working state of the tool is monitored by high-speed camera. At last, the micro-chip samples are collected, experimental results similar to the results of numerical simulation by means of the SEM to observe and analysis the submicroscopic morphology characteristics. It reveals the cutting characteristics and chip formation mechanism of amorphous alloy under micro cutting condition. The research data can provide reference for the development of micro tool.

Key words: amorphous alloy; sheet chip; PCD tool; micro cutting; adiabatic model

0 前言

玻璃态合金是不具有长程原子有序的金属合金, 又称为非晶态金属或非结晶合金^[1,2]。此类合金

可由多种工艺制备, 但所有制备工艺都涉及将合金成分从气态或液态快凝成固态的过程。由于其凝固速度非常快, 以至于将原子的液体组态冻结住, 这便使其具备了独特的磁性能、电性能、抗腐蚀性能、热性能(热膨胀系数几乎为零)以及力学性能。因此, 玻璃态合金成为航空航天领域不可或缺的重要结构材料, 同时也在兵器、船舶、化学、石油、冶金工业以及食品、医疗等领域得到广泛应用^[3]。为了有

* 国家科技重大专项资助项目(2018ZX04042-001)。20190211 收到初稿, 20190810 收到修改稿

效发挥玻璃态合金的功能化作用,在实际生产过程中经常需要对其进行切削加工,这就使得研究此类材料的切削加工技术显得十分必要。

近年来国内外专家对玻璃态合金已经进行了大量的系统性研究工作,实际生产也积累了丰富的经验,尤其是对此类合金综合性能方面的研究更是已经形成了一整套较为完善的数据体系。国外学者 GLEZERA 等^[4]进行了非晶纳米晶合金变形剪切带与纳米颗粒相互作用方面的研究,其从理论和试验上分析了非晶纳米晶铁镍硼玻璃态合金剪切带与纳米晶的相互作用机制,发现了纳米晶尺寸是影响这种相互作用的关键因素;HERTSYK 等^[5]研究了低温处理对玻璃态合金 $\text{Fe}_{78.5}\text{Ni}_{1.0}\text{Mo}_{0.5}\text{Si}_{6.0}\text{B}_{14.0}$ 理化性能稳定性的影响,发现温度梯度 $\Delta T=(298-77)\text{K}$ 的高速冷却(1-3 s)对等体积参数下的微硬度和磁性有影响;GONG 等^[6]研究了铜合金化对 $\text{Ti}_{41}\text{Zr}_{25}\text{Be}_{28}\text{Fe}_6$ 大块玻璃态合金结晶动力学的影响,发现了铜合金化提高了 $\text{Ti}_{41}\text{Zr}_{25}\text{Be}_{28}\text{Fe}_6$ 玻璃态合金在连续加热下的玻璃化转变和结晶活化能;ZIYA 等^[7]采用 X 射线衍射、光学显微镜、扫描电子显微镜和差示扫描量热法,系统研究了 Cu 和 Si 取代 Co 和 B 对 $\text{Co}_{(43-x)}\text{Cu}_x\text{Fe}_{20}\text{Ta}_{5.5}\text{B}_{(31.5-x)}\text{Si}_y$ ($x=0-1.5$, $y=5-10$)玻璃态合金形成能力的影响;LOUZGUINE-LUZGIN 等^[8]研究了 Zr-Cu-Ni-Al 块状玻璃态合金、Zr-Ni-Cu-Al-Pd 玻璃箔及 Ni-Cu-Ti-Zr 块状晶体玻璃复合材料的变形行为。最后,从晶体位错滑移与玻璃基体剪切变形的相互作用出发讨论了塑性变形的基本机制;KOZIE 等^[9]研究 $\text{Zr}_{52.5}\text{Cu}_{17.9}\text{Ni}_{14.6}\text{Al}_{10}\text{Ti}_5$ 玻璃态合金的力学性能并分析了应变速率和晶体包裹体对合金变形和断裂机制的影响;国内学者黄火根等^[10]研究了微合金化对 U-Co 玻璃态合金形成能力的影响,发现 Sn 添加对 U-Co 合金的 GFA 具有明显改善作用, Si 次之, Be、Cu 影响最小,而 Pd、Y、Zr 元素则起反作用;李春燕等^[11]研究了 ZrCuNiAlEr 块体玻璃态合金尺度效应,揭示了尺寸大小对玻璃态合金力学性能的影响规律。

当然,在玻璃态合金切削机理方面的研究国内外学者也取得了长足的进步。WANG 等^[12]研究了切削参数对铁基玻璃态合金覆盖层再制造切削力的影响,其发现切削深度是影响切削力分量的主要切削参数。前角、进给速度和切削速度的相互作用对切削力具有次要意义。切削速度对切削力分量的影响最小,并最终建立了机械加工力的预测模型;孙国元等^[13]研究了块体玻璃态合金的加工硬化行为,通过对几种典型玻璃态合金加工硬化行为的分析,归纳性地讨论了玻璃态合金加工硬化起源机制;张艳等^[14]以玻璃态合金切削过程中的屈服形变为研究

对象,研究了玻璃态合金切削加载的形变屈服准则并通过切削试验进行验证;刘寅等^[15]采用有限元工艺仿真系统对块体玻璃态合金微磨削加工过程中的温度场进行仿真,实现了对其磨削加工温度的有效预测;WANG 等^[16]研究了飞秒激光烧蚀锆基玻璃态合金的形貌与氧化规律,其研究表明:通过调节参数可以避免在加工区域附近产生熔痕、飞溅和结晶,飞秒激光是实现玻璃态合金加工的另一新途径;VOLKHONSKII 等^[17]采用过滤阴极真空电弧沉积法制备具有多层结构的 Ti-Al-Si-N 超硬非晶涂层,研究了其在断续切削过程中的破坏机理。

综上所述,目前针对玻璃态合金的研究主要还是集中在研究其制备、综合力学性能以及理化属性等方面,如:抗拉强度、抗弯强度、热力学属性等;而在玻璃态合金加工技术方面的研究,主要集中在常规车削、铣削、磨削以及激光烧蚀等方面,而对其切削特性方面的研究则是少之又少,尤其是针对此种材料在微切削条件下的切削机理研究更是少见相关报道。

与传统切削相比,微切削的切削机理及工件材料的变化规律相对特殊,其受尺寸效应的影响非常明显^[18],主要体现在以下几方面。

(1) 切削力的尺寸效应。微切削的切削力不大,但是刀-屑接触面积却很小,因此在微切削条件下切削应力表现出比传统切削更大的状态。

(2) 摩擦力的尺寸效应。微切削过程中,塑性变形会导致晶格振动能的增加,此时的摩擦力主要依赖于接触面积和接触形态,因此可以充分利用微摩擦学的尺寸效应使微切削向有利的方向发展。

(3) 切削热的尺寸效应。通常情况下,金属材料晶体的线度在几微米到几十微米之间,结晶析出物及微细晶粒的尺寸为 $0.1\ \mu\text{m}$,位错台阶的尺寸为 $0.01\ \mu\text{m}$,这些特征尺寸与微切削的切削参数同属一个尺度范畴,因此切削过程中切削区域的导热系数会降低,材料的力学性能将表现出与常规切削的巨大差异性。

此外,常规切削过程中金属材料通常具有各种缺陷,如:杂质、裂纹、夹砂、空穴等,当研究尺度变小时,必须将所研究的区域材料视为不均匀和各向异性。然而,当切削参数与材料晶粒尺寸相近时,切削过程中的应力组成形式便会发生转变,即:从沿晶界、空隙等缺陷域的剥离应力转变为移除晶粒位错、滑移甚至断裂所需要的应力。因此,微切削的切削机理与传统切削有着本质上的区别,尤其是进行玻璃态合金(非结晶状态合金)的微切削研究更是一项具有一定难度和解决实际生产的技术攻关课题。

本文采用数值模拟分析结合切削试验和光学扫描系统观测的研究方法,对典型玻璃态合金 $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$

的切削过程进行研究，分析其在微切削条件下的切削特性及其影响作用要素，揭示微切屑形成机理，从而为各向同性材料的高品质加工及专用刀具的设计提供数据参考。

1 切削试验

1.1 试验原理

进行典型玻璃态合金 $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ 微切削试验，采集其在不同切削参数条件下切削力和切屑形态等数据。试验原理如图 1 所示，其中微铣刀装在热缩刀柄上与无线测力仪连接，主要监测微切削过程中

的动态载荷，试验前需要对整个系统进行固有频率及空载载荷标定；高速摄影系统主要用来监测切削过程中刀具-工件接触状态以及微切屑形成过程。该系统主要由高速摄影机和影像捕捉系统组成，通过影像反射原理可以确保该系统的焦点始终与切削区域保持一致，因此可以实时采集到清晰的影像数据；铣削过程中的切屑样本由切屑收集器采集，由于采用柔性真空吸附，所以能有效避免切屑样本的变形或损坏。

最后，借助光学扫描系统分别对已加工表面和切屑亚微观形态进行观测，从而分析研究玻璃态合金切削特性及其切屑生成机理。

图 1 微切削试验原理图

1.2 试验方法

试验工件：典型玻璃态合金 $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ ，其物理性能如表 1 所示。

表 1 玻璃态合金 $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ 物理特性

参数	数值
居里温度 T_c/K	843
密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	8.32
磁场强度 $H_c/(\text{A}\cdot\text{m}^{-1})$	0.8
$\lambda_s/10^{-6}$	+2.1
磁通密度 B_{80}/T	1.87

试验刀具：采用 PCD 金刚石微型刀具，前角 $\gamma=20^\circ$ 、后角 $\alpha=5^\circ$ 、刀尖圆弧 $r=0.12\text{ }\mu\text{m}$ 。

试验监测：切削过程机械载荷监测与数据收集采用 SPIKE wireless 无线测力系统。

试验机床：埃马克 VTCGT。

切削参数及方式： $a_p=0.1\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ ； $v_c=20\sim 900\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$ ； $f=0.1\text{ }\mu\text{m}/\text{r}$ ；干式切削。

样本分析：采用 BRUKER 3D 光学扫描系统(精度 0.1 nm)和卡尔·蔡司 SIGMA 500 场发射扫描电镜对试验件切削表面形貌及切屑样品亚微观形貌特征进行分析。

1.3 试验结果

图 2 为扫描电镜观测到的玻璃态合金切屑 ($v_c=400\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$ ； $a_p=5\text{ }\mu\text{m}$)，从采集到的图像信息分析此类切屑为片层状结构。分析得知出现这种情况的原因可能是：材料在切削区域出现周期性的局部集中形变而引起材料的层叠(图 2a)。从亚微观形貌看，这种切屑以剪切带和工件表面交界处为起点，沿切屑弯曲方向呈均匀间隔的连续性层叠分布状(图 2b)，同时还发现在切削试验过程中，刀具未失效前几乎所有切削条件下均产生此类片层状的切屑。尽管在常规金属切削过程中也存在连续断裂面结构的切屑，但是其生成机理主要是金属受机械挤压-塑性变形-断裂过程的影响，并且产生这种情况只存在于某些晶体方向，这与微切削条件下玻璃态合金片层状切屑的生成机理有着本质上的区别。

(a) 微型切屑正面形貌特征

(b) 微型切屑边界挤压形貌特征图
 $v_c=400 \mu\text{m}/\text{min}; a_p=5 \mu\text{m}/\text{min}$

图2 微切削条件下玻璃态合金切屑亚微观形貌特征

试验过程中通过 BRUKER 3D 光学扫描系统对不同切削深度 a_p 条件下所采集到的切屑样本进行三维重塑扫描。因为该系统采用复合光源扫描技术,

(a) BRUKER三维重塑扫描测量形貌

(b) 微切屑结构特征数据曲线

图3 切削深度 a_p 与切屑断层间距离 l 关系分析

图4 微切削条件下试验工件已加工表面和切屑横截面特征光学图

因此不仅可有效避免因切屑的不规则形状而引起干涉、遮挡等问题的产生,而且可以省掉将切屑制作成切片的辅助工作,此外可根据实际需要对样品任意位置进行角度、距离、体积等方面的高精度分析。

试验过程中通过该系统测量断层之间的结构特征数据并将所获取的数据绘制成曲线(图3)。图3曲线为切削深度 a_p 与切屑断层间距离 l 的关系规律曲线图。切削试验发现:在不同切削速度 v_c 条件下,随着切削深度 a_p 的增加,切屑断层间距离 l 均表现为伴随性递增的情况而完全没有常规金属切削过程中出现的切削深度 a_p 尺寸效应^[19]。而出现切屑断层间距离 l 不受切削速度 v_c 影响的这种特殊现象,通过分析主要原因是玻璃态合金为各向同性材料,没有常规金属材料的杂质、裂纹、空穴等缺陷。

图4为光学扫描系统观测到的工件加工表面形貌,其中平行于切削方向的凹槽是刀具切削刃微观缺口所留下的划痕。此外,从扫描图可以清晰的观测到已加工表面形态的周期性特征与切屑断层几乎相同。从图4中的切屑根部局部放大图完全看不到材料断裂现象,分析其主要原因应该是:玻璃态合金的片层状结构切屑主要是由切削区域局部集中变形所引起的,并且这种情况只发生在一个很窄的尺寸范围 W 内(试验发现 $W \leq 5 \mu\text{m}$)。针对这种现象,根据文献[20-22]研究:出现上述情况的主要原因是:在切削区域材料的变形处于大应变速率与类绝热的状态。下面将通过数值模拟方法对玻璃态合金切屑的生成进行数值模拟分析以揭示其生成机理。

2 微切削条件下的数值仿真分析

2.1 数值仿真的理论分析

数值仿真模拟分析是研究各向同性金属材料切削过程中塑性变形的最有效方法之一。本文采用 ABAQUS 分析典型玻璃态合金微切削条件下切屑形成过程。同时, 为了精准分析此种材料切屑的形成机制需要在运算数据库中导入绝热变形本构模型。

本文假设工件在切削过程中由于机械载荷的挤压, 材料可以被适当压缩, 同时该压缩变形过程满足范氏等效应力条件, 那么根据范氏屈服条件, 挤压应力可描述为

$$\bar{\sigma}^2 = 1.5\sigma'_{ij} \cdot \sigma'_{ij} + \alpha \left(\frac{1}{3}\sigma'_{kk} \right)^2 \quad (1)$$

式中, σ'_{ij} 为偏应力张量, 其描述模型系数服从爱因斯坦求和约定; α 为表征材料可压缩性常数。

其中, 随着 α 值的降低, 描述模型(1)计算结果越接近范氏屈服理论条件。根据材料塑性位错理论, 切削过程中工件切削区域的应力 σ_{ij} 和应变速率 ξ_{ij} 关系可描述为

$$\sigma_{ij} = \frac{\bar{\sigma}}{\xi} \cdot \left[0.66\dot{\xi}_{ij} + \eta_{ij} \left(\frac{1}{\alpha} - 0.22 \right) \dot{\xi}_{kk} \right] \quad (2)$$

式中, η_{ij} 为克罗内克常数。

为了使等应变速率 $\bar{\xi}$ 满足数值解析方程式(3)

$$\bar{\sigma} \cdot \bar{\xi} = \sigma_{ij} \xi_{ij} \quad (3)$$

令 $\bar{\xi}$ 描述模型为

$$\bar{\xi}^2 = 0.66 \cdot \dot{\xi}_{ij} \dot{\xi}_{ij} + \left(\frac{\dot{\xi}_{kk}}{\alpha} \right)^2 \quad (4)$$

根据以上数值模型, 解析式(2)后便可通过应变速率分量直接计算出应力分量。那么, 按照极限理论: 当切削区域应力场处于平衡状态时, 工件材料应变速度场 v_i 可使函数 λ 处于极限最小值。因此, 可对函数 λ 计算如下

$$\lambda = \int_V \bar{\sigma} \cdot \bar{\xi} dV - \int_{S_f} T_i v_i dv \quad (5)$$

式中, V 为工件体积; S_f 为刀-屑摩擦力产生的有效面积。

如果 α 足够小, 那么工件切削区域不可压缩条件 $\dot{\xi} = 0$ 只有在 λ 值最小的条件下才能满足。因此, 当 α 在 0.01~0.001 范围时, 方程所描述的由速度场引起的体积应变速率 $\dot{\xi}_{kk}$ 将趋于 0, 此时工件材料的

体积几乎保持不变。通过数值仿真分析方法, 函数 λ 可以由工件网格节点速度的非线性方程描述并且可以借助牛顿迭代法进行求解。

从切削试验数据分析可知, 玻璃态合金切削区域局部塑性变形虽然只发生在一个很小的区域, 但即便是在低切削速度的情况下, 该变形区域仍呈现出高应变速率状态。因此, 结合先前文献的研究, 玻璃态合金的切削区域变形几乎发生在类绝热状态下。那么, 通过在 ABAQUS 软件导入绝热变形本构模型, 微切削条件下玻璃态合金切屑形成机理便可较为准确地被模拟仿真出来。

此外, 切削过程中热量的产生可以通过不可逆塑性切削速率来描述, 如下

$$\dot{\omega} = m \bar{\sigma} \bar{\xi} \quad (6)$$

式中, m 为材料绝热变形因子, 其大小决定了工件材料变形绝热程度的高低。其中, 当 $m=1$ 时, 材料处于完全变形状态。因此, 可以将 m 视为应变速率的函数, 其可描述为

$$\begin{cases} m = 1 - \exp\left(-A_h \frac{\bar{\xi}}{\xi_0}\right) \\ \bar{\xi} = \frac{v}{h_D} \end{cases} \quad (7)$$

式中, v 为切削速率; h_D 为切削厚度; A_h 为材料形变系数。

为了能够通过上述模型对切削过程进行较为精准的分析, 变形应力 $\bar{\sigma}$ 可表示为切削温度的函数。结合图 5 中的温度与维氏硬度关系曲线^[23], 变形应力 $\bar{\sigma}$ 与温度的函数方程可描述为

$$\begin{cases} \sigma_1 = 3607 \cdot (273 - 573K) - 2.5T \\ \sigma_2 = 9273 \cdot (573 - 723K) - 12.4T \end{cases} \quad (8)$$

图 5 玻璃态合金 $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ 维氏硬度与温度的关系曲线

由于玻璃态合金是单向无定形结构材料, 其内

部不存在晶界、位错和层错等诸多缺陷,因此表现出了较高的硬度和较强的韧性状态,微切削过程中其变形应力无法被直接测出。文献[24-25]研究表明:非晶态合金在较为恒定的大应变条件下,其变形应力会随时间的变化而减小到某个极限值,该极限值通常为维氏硬度的 40%~50%,且在该极限值条件下材料结构处于重新调整的状态或趋势。因此本文中仿真分析所需的变形应力值采用试验合金维氏硬度的 45%进行界定。

其中,切削仿真分析的条件如下所述。

(1) 切削速度 $v_c=30 \mu\text{m}/\text{min}$; 切削深度 $a_p=5 \mu\text{m}$; 进给量 $f=0.1 \mu\text{m}/\text{r}$; 刀具前角 $\gamma=20^\circ$ 。

(2) 仿真分析设工件和刀具均为均质刚性体且刀-屑间摩擦因数为 0.7。其中,摩擦因数的大小是通过在平稳切削过程中将数据采集系统采集到的主切削力、进给力、轴向力分别与作用在刀具前刀面平行于切削刃的切削分力、垂直于前刀面的法向切削分力、前刀面内垂直于切削刃的切削分力进行计算所得的摩擦因数平均值。

模拟开始前,先设置温度 T 为常温,然后通过模型式(8)获得对应的变形应力。接着通过 ABAQUS 计算获得入切瞬间切削区域的变形场,然后通过模型式(7)计算获得绝热变形因子,同时结合模型式(6)计算温度的变化值。最后综合方程的计算结果进行变形场的修正并确定玻璃态合金的修正系数,然后按照顺序进行下一步计算分析并最终得到结果。

2.2 数值仿真结果

在微切削条件下,玻璃态合金上的切削层在厚度和长度方向上的变形量均较小。因此,根据体积不变原理:厚度变形系数与长度变形系数几乎一致^[26]。经过对不同变形系数 A_h 的模拟分析,发现只有在 $A_h \geq 1$ 的条件下数值模拟的结果才会与实际情况基本相同。因此,为了便于计算分析,仿真过程在 $A_h=1$ 的条件下进行(图 6)。

从图 6 数值模拟云图可以发现,在不同相对切削距离条件下,切削区域出现不同的变化情况,如:当 $L=0.3$ 时,切削区域开始出现变形且向剪切层集中;当 $L=0.5$ 时,刀-屑挤压区出现第一剪切带;当 $L=0.7$ 时,刀-屑挤压区出现第二塑性变形区;随着切削的继续,在 $L=0.9$ 时切削区域出现第二剪切带。

图 7 为数值模拟分析刀-屑间切削温度分布云图。从图中可以看出,入切瞬间切削刃附近的工件材料温度最高(图 7a);随着切削的进行,剪切区域塑性变形程度增加,切削温度会沿着剪切区域分布上升(图 7b)。由解析模型式(8)可知,工件材料在该区域因高温而产生软化效应。

图 6 玻璃态合金等应变速率 $\bar{\xi}$ 数值模拟云图

图7 玻璃态合金温度分布数值模拟云图

根据仿真分析数据可知: 在玻璃态合金的微切削过程中由于切削区域的类绝热状态而引起该区域切削热大量堆积进而使各变形区域间的温度骤升, 最终导致该区域材料的高温软化。与此同时, 切削过程中切屑呈现出周期性的片层状结构特点, 因此, 通过上述两方面的情况可进一步说明: 玻璃态合金切削区域所呈现出的片层结构状态均为周期性局部应力集中所致。

3 试验分析与验证

文中通过热场扫描电镜观察玻璃态合金 $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ 产生的片层状切屑并通过 ABAQUS 进行仿真模拟以研究其形成机理。下面将通过切削试验对数值模拟分析的切屑形态和切削力进行比较分析。

3.1 玻璃态合金 $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ 的切屑形态

图 8 为玻璃态合金 $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ 切削过程中不

同阶段切屑形态与 ABAQUS 数值模拟结果的对比图。从图 8 中变形云图可以看出: 在 $L=0.1$ 时, 数值仿真模型中的挤压区域产生相对均匀的变形(图 8a); 随着切削的进行, 在 $L=0.3$ 时, 切削区域开始出现变形, 且向剪切层集中(图 8b); 在 $L=0.5$ 时, 第一变形区达到极限, 出现变形后效; 在 $L=0.7$ 时, 第二剪变形区形成(图 8c); 在 $L=0.9$ 时, 第二剪切带形成, 伴随着切削的不断进行切屑生成的过程在不断地重复, 从而形成了片层状切屑(图 8d)。数值仿真模拟形成的片层状切屑间的平均距离约为切削深度 a_p 的 70%; 而在相同切削参数下, 试验获得片层状切屑间的平均间距约为切削深度 a_p 的 80%。数值结果和切削试验结果存在较小的差异性, 分析出现这种情况的主要原因有:

首先, 理论数值计算和实际切削过程中切削区域的剪切角有所差别, 如: 当在 $L=0.3$ 时, 数值模拟的剪切角约为 52° , 而切削试验的实际剪切角约为 50° 。剪切角差异性的存在主要是在实际切削过程中刀-屑接触状态受热-力耦合作用后不断地产生波动, 最终导致切削状态的波动性变化。

其次, 数值仿真分析的切削环境较为理想, 数值计算主要靠材料的本构模型, 材料的理化属性相对稳定; 而实际切削过程中, 材料的某些理化属性会随试验条件的改变而改变, 如: 弹性模量会随温度的变化而变化。因此, 在材料变形方面也存在一定的差异性。

虽然数值仿真分析与实际切削存在一定的差异性, 但是从不同阶段采集到的切屑样本可以看出, 模拟的结果与切削试验所得结果总体趋势较为一致。因此, 采用数值仿真分析系统进行玻璃态合金切削机理方面的分析研究是可行的。

图8 数值仿真分析与试验结果对比

3.2 玻璃态合金 $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ 的切削力

将试验过程中无线测力仪监测到的载荷数据与刀具有效参与切削的工作部位法向面积进行换算,便可计算获得实际切削过程中不同阶段的切削应力;与此同时,通过数值仿真分析计算也可获得与实际切削相同距离内的理论切削应力数值。最后,将实际切削应力数值与理论切削应力数值描绘成规律曲线(图 9)。

图 9 相对切削距离 L 与切削应力 P_c 的关系曲线

图 9 中的规律曲线直观地反映出了切削过程中不同阶段切削应力 P_c 与相对切削距离 L 的关系特点。从图 9 中的切削应力曲线发展趋势分析可知：在入切之初切削应力伴随刀-工件的接触挤压而呈幂函数曲线增长状态。随着切削进入平稳阶段，切削应力 P_c 以某一个恒定值为中心线呈现出近似正弦函数分布状态且其波动最大值不会超过某一特定的极限值，根据数据采集系统监测节点可知该最大值出现在切屑临近折断的瞬间，其中实际切削应力极限最大值约为 3 280 MPa，理论切削应力最大值约为 3 300 MPa。

此外，从图 9 中规律曲线还可以看出实际切削应力曲线与理论切削应力曲线的波动均具有一定的周期性，而这个周期规律与片层状切屑产生的周期接近并且两条曲线的总体发展趋势、波动周期、波动幅度以及极限值相似度均比较高，这也进一步验证了数值仿真分析的准确度。

4 结论

(1) 与常规金属切削不同的是玻璃态合金切削过程中产生的切屑为片层状结构。通过热场扫描电镜观测和数值模拟分析，发现这种情况主要是由于切削区域的热-力局部堆积引起该区域的局部集中变形所引起的，并且这种局部变形通常发生在宽度小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的窄小区域内。

(2) 在微切削条件下，玻璃态合金切屑断层之

间的距离 l 受切削深度 a_p 的影响，即：断层间距 l 随切削深度 a_p 的增加而呈现伴随性递增的状态，完全没有常规金属切削过程中出现的切削深度 a_p 尺寸效应。

(3) 微切屑断层之间的距离 l 受切削速度 v_c 的影响较小，在相同切削深度 a_p 、进给量 f 和不同切削速度 v_c 条件下微切屑的形成状态一致性较高。

(4) 在数值模拟软件中引入绝热变形本构模型后对玻璃态合金的切削过程进行分析，获得绝热变形引起切削区域的局部集中变形的规律性，同时结合微切削试验研究，揭示了片层状切屑的形成机理。

(5) 在引入本构模型后，进行数值模拟分析，其结果与切削试验在总体发展趋势、波动周期、波动幅度以及极限值等方面的相似度均比较高。因此，采用数值仿真模拟手段进行微切削方面的研究是一种可借鉴的手段。

参 考 文 献

- [1] 李培友. Ti-Cu 基非晶合金玻璃形成能力与力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(2): 509-514.
LI Peiyou. Glass forming ability and mechanical properties of ti-cu-based bulk metallic glasses[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(2): 509-514.
- [2] 姚可夫, 施凌翔, 陈双琴, 等. 铁基软磁非晶/纳米晶合金研究进展及应用前景[J]. 物理学报, 2018, 67(1): 1-8.
YAO Kefu, SHI Lingxiang, CHEN Shuangqin, et al. Research progress and application prospect of Fe-based soft magnetic amorphous/nano-crystalline alloys [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(1): 1-8.
- [3] 韩焯, 朱胜利, 井上明久. 铁基软磁非晶合金和块状金属玻璃的研究进展[J]. 功能材料, 2016, 47(3): 3027-3032.
HAN Ye, ZHU Shengli, INOUE A. The development of Fe-based soft magnetic amorphous and bulk metallic glassy alloys [J]. Journal of Functional Materials, 2016, 47(3): 3027-3032.
- [4] GLEZERA M, SHURYGINA N A, ZAICHENKO S G, et al. Interaction of deformation shear bands with nanoparticles in amorphous-nanocrystalline alloys [J]. Russian Metallurgy (Metally), 2013, 2013(4): 253-244.
- [5] HERTSYK O M, KOVBUZ M A, PEREVERZEVA T G, et al. An effect of low temperature processing on stability of physical and chemical properties of amorphous alloy Fe78.5Ni1.0Mo0.5Si6.14.0 [J]. Russian Journal of Applied Chemistry, 2013, 86(6): 802-806.

- [6] GONG Pan, YAO Kefu, ZHAO Shaofan. Cu-alloying effect on crystallization kinetics of $\text{Ti}_{41}\text{Zr}_{25}\text{Be}_{28}\text{Fe}_6$ bulk metallic glass [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2015, 121(2): 697-704.
- [7] ZIYA O Y, AYTEKIN H, YILMAZ Y, et al. Effects of minor Cu and Si additions on glass forming ability and mechanical properties of Co-Fe-Ta-B Bulk metallic glass [J]. *Metals and Materials International*, 2016, 22(1): 50-57.
- [8] LOUZGUINE-LUZGIN D V, VINOGRADOV A, LI S, et al. Deformation and fracture behavior of metallic glassy alloys and glassy-crystal composites [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2011, 42(6): 1504-1510.
- [9] KOZIE T, PAJOR K, CIO S G, et al. Effect of strain rate and crystalline inclusions on mechanical properties of bulk glassy and partially crystallized $\text{Zr}_{52.5}\text{Cu}_{17.9}\text{Ni}_{14.6}\text{Al}_{10}\text{Ti}_5$ alloy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, 29(5): 1036-1045.
- [10] 黄火根, 柯海波, 刘天伟, 等. 微合金化对 U-Co 金属玻璃形成能力的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2018, 47(3): 990-994.
- HUANG Huogen, KE Haibo, LIU Tianwei, et al. Effect of minor alloying on the glass forming ability of U-Co alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, 47(3): 990-994.
- [11] 李春燕, 尹金锋, 王铮, 等. ZrCuNiAlEr 块体金属玻璃尺度效应的研究[J]. *功能材料*, 2017, 48(7): 130-135.
- LI Chunyan, YIN Jinfeng, WANG Zheng, et al. Study on the size effect of ZrCuNiAlEr bulk metallic glass [J]. *Journal of Functional Materials*, 2017, 48(7): 130-135.
- [12] WANG Min, XU Binshi, DONG Shiyun, et al. Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces in turning of Fe-based amorphous overlay for remanufacture [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 65(5-8): 735-743.
- [13] 孙国元, 张敏. 块体金属玻璃的加工硬化行为[J]. *材料导报*, 2019, 33(3): 462-469.
- SUN Guoyuan, ZHANG Min. The work-hardening behavior of bulk metallic glasses [J]. *Materials Review*, 2019, 33(3): 462-469.
- [14] 张艳, 王咏萱, 赵岩, 等. 金属玻璃切削加载的形变屈服准则与试验验证[J]. *高技术通讯*, 2017, 27(3): 285-293.
- ZHANG Yan, WANG Yongxuan, ZHAO Yan, et al. The deformation yield criterion of metallic glass in the cutting process and its experimental verification [J]. *Chinese High Technology Letters*, 2017, 27(3): 285-293.
- [15] 刘寅, 巩亚东, 孙瑶, 等. 块体金属玻璃微磨削加工的温度场仿真[J]. *东北大学学报*, 2018, 39(6): 828-833.
- LIU Yin, GONG Yadong, SUN Yao, et al. Simulation of Temperature Field for Bulk Metallic Glass in Micro-scale Grinding [J]. *Journal of Northeastern University*, 2018, 39(6): 828-833.
- [16] WANG Xinlin, LU Peixiang, DAI Nengli, et al. Morphology and oxidation of Zr-based amorphous alloy ablated by femtosecond laser pulses [J]. *Applied Physics A*, 2007, 89(2): 547-552.
- [17] VOLKHONSKII A O, BLINKOVI V, BELOV D S. Superhard amorphous/nanocrystalline multilayer coatings for carbide inserts used for intermittent cutting [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96(5-8): 2953-2962.
- [18] 张涛. 微切削加工单位切削力及表面加工质量的尺寸效应研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- ZHANG Tao. Investigation on size effect of specific cutting force and machined surface quality in micro cutting [D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [19] 何耿煌, 吴明阳, 李凌祥, 等. 典型钛合金切削层相变形成机理及其影响因素研究[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(17): 133-141.
- HE Genghuang, WU Mingyang, LI Lingxiang, et al. Study on the formation mechanism of phase transformation and the influencing factors of cutting layer of the typical titanium alloy[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(17): 133-141.
- [20] 赵岩, 魏勋利, 张艳, 等. 非晶态合金的零件成形加工技术与形变机理分析[J]. *高技术通讯*, 2014, 24(11): 1176-1186.
- ZHAO Yan, WEI Xunli, ZHANG Yan, et al. A review of the manufacturing technologies and deformation mechanisms of amorphous alloys [J]. *Chinese High Technology Letters*, 2014, 24(11): 1176-1186.
- [21] UEDA K, 肖旭东. 非晶金属微切削时切屑形成机理研究[J]. *国外金属加工*, 1993(6): 20-25.
- UEDA K, XIAO Xudong. Study on chip formation mechanism in micro cutting of amorphous meta[J]. *Journal of International Metal Working*, 1993(6): 20-25.
- [22] 惠希东, 陈国良. 块体非晶合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- HUI Xidong, CHEN Guoliang. Bulk amorphous alloy [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [23] PEIXOTO E B, MENDONCA E C, MERCENA S G, et al. Study of the dynamic of crystallization of an amorphous $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ ribbon through Johnson-Mehl-Avrami model [J]. *Journal of Alloys and Compounds: An Interdisciplinary Journal of Materials Science and Solid-*

- state Chemistry and Physics, 2018, 731: 1275-1279.
- [24] GU Bin, LIU Feng, CHEN Yuzeng, et al. Structural modification and phase transformation kinetics: crystallization of amorphous Fe₄₀Ni₄₀P₁₄B₆ eutectic alloy [J]. Journal of Materials Science, 2014, 49(2): 842-857.
- [25] MILICA M V, PAVLA R, NADĚŽDA P, et al. Thermally induced structural transformations of Fe₄₀Ni₄₀P₁₄B₆, amorphous alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2016, 47(1): 260-267.
- [26] CHARLES K, WALTER K, MALVIN R, et al. Berkeley physics course (In SI Units) mechanics [M]. New York: McGraw Hill Education, 2017.

作者简介: 何耿煌, 男, 1984 年出生, 博士, 高级工程师。主要研究方向为智能制造、极端制造及其先进刀具技术。
E-mail: sweetspyhgh@126.com