

# 铍材料塑性域微细铣削加工机理及工艺

吴优,熊雪峰,贾磊

中国工程物理研究院材料研究所

**摘要:** 通过定量计算求得铍材料实现脆塑转变的临界切削厚度;通过对微细铣削切削力的检测、加工表面的形貌特征表征,探讨影响铍样品微细铣削加工脆塑转变过程的裂纹衍生扩展与微量切屑粘结机理;根据该机理,利用微细铣削加工工艺,在刀具切入侧实现铍样品的塑性加工,并获得了良好的表面质量。

**关键词:** 微细铣削;脆塑转变;铍

**中图分类号:** TG506;TH16

**文献标志码:** A

**DOI:**10.3969/j.issn.1000-7008.2019.12.017

## Mechanism and Process of Ductile Micro-milling for Beryllium

Wu You, Xiong Xuefeng, Jia Lei

**Abstract:** The brittle-ductile transition cutting thickness of beryllium is achieved by calculation. The initiation & propagation of small cracks and micro cutting chips adhesion theory is proposed by micro-cutting force and surface quality test. Under the instruction of this theory, the ductile regime machining of beryllium sample is achieved, whose surface quality is very excellent.

**Keywords:** micro-milling; brittle-ductile transition; beryllium

## 1 引言

铍具有低密度、高熔点、高比刚度、低膨胀系数、高尺寸稳定性和高热中子散射性能等优良物理特征(见表1)。

表1 常见金属材料性能对比

材料	比刚度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	密度 (g/m <sup>3</sup> )	线膨胀系数 (10 <sup>-6</sup> /K)
Mg	26	45.5	3.79	26.1
Al	26	74.2	2.70	21.4
Cu	14	126	8.89	17
Ti	23	102	4.51	8.7
不锈钢	23	196	7.8	17.5
Be	164	300	1.84	11.5

铍材料在200℃以下时,与普通有色金属相比机械加工性能较差,难以实现高效快捷以及高质量的加工。这是因为常温下的铍晶体结构为密排六方体,滑移系较少,极易发生解理断裂;同时常温下材料的延伸率小于5%,在常规机械加工中,经常会出现局部断裂和锐边崩边的缺陷<sup>[1]</sup>。

为提高铍材料的机械加工质量,本文探讨了单质铍材料的脆塑加工转变条件,系统阐述了其脆塑转变过程,提出了加工过程中的脆塑转变机制。

## 2 铍材料脆塑转变临界切削厚度的理论计算

采用维氏硬度计,通过压痕法,对铍样品(RJY

-40级)的表面硬度进行实际检测,测得铍样品硬度约为4.9GPa。根据不产生裂纹的临界条件和裂纹扩展准则,当样品表面裂纹数量少于10%时<sup>[2]</sup>,可以认为脆性材料已向塑性域加工方式发生转变,此时其切深应小于临界值 $t_c$ , $t_c$ 的计算公式为

$$t_c = \Psi \left( \frac{E}{H} \right) \left( \frac{K_{IC}}{H} \right)^2 \quad (1)$$

式中, $\Psi$ 为与压头材料相关的系数,本次 $\Psi=0.15$ ;  $E$ 为材料的弹性模量, $E=290\text{GPa}$ ;  $H$ 为材料的硬度, $H=4.9\text{GPa}$ ;  $K_{IC}$ 为材料断裂韧性,根据该批次铍材的力学性能,实验取 $K_{IC}=3.8\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。

将各材料参数代入式(1),可以得到切削厚度的临界值 $t_c \approx 5\mu\text{m}$ ,即理论上当切削深度不大于 $5\mu\text{m}$ 时,有可能在切削过程中以塑性流动的方式去除金属,从而得到较为良好的表面光洁度。

## 3 铍样品微细铣削加工试验

### 3.1 微细铣削试验方案

**加工设备:**具备微米进给精度的哈默精密加工中心,该加工中心每脉冲进给量为 $1\mu\text{m}$ ,经过精度验证,基本满足微米级进给加工的需求。

**检测设备:**Kistler型测力仪和奥林巴斯金相显微镜,在前期试验中发现,由于分辨率原因,该型测力仪对1N以下力的检测能力有限,故在检测中主要对加工中切削力的最大载荷值进行测定比较。

**加工刀具:**按照试验需求,要求刀具本身具有较

小的半径,刃口锋利,较高的切削稳定性和均匀性;同时由于球头铣刀具有较好的刃口形状与较小的切削力,被广泛应用于石英玻璃、特种陶瓷等硬脆材料加工,所以选择球头微铣刀(直径为1mm)作为试验刀具(见图1)。

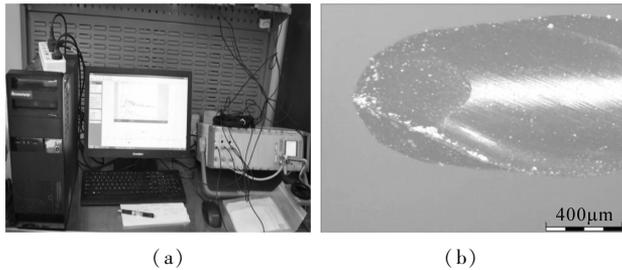


图1 切削力检测系统和直径1mm的球头铣刀

试验过程:在经典硬脆材料不产生裂纹临界条件和裂纹扩展准则下,决定脆塑转变的最主要因素是切削深度。根据理论计算,当切深小于 $5\mu\text{m}$ 时,被材料有可能以塑性流动的方式被去除。综上,为了研究切削参数,特别是转速与进给速度对脆塑转变的影响,选定 $3\mu\text{m}$ 切削深度,变换转速与进给速度,通过切削力检测与形貌微观检测的方法,开展铍样品工艺试验分析。

### 3.2 转速与进给速度对脆塑转变的影响

#### (1) 切削力的检测分析

固定微细铣削加工的吃刀深度为 $3\mu\text{m}$ ,转速和进给速度的变化范围两两交叉进行微细铣削加工试验,如表2所示。

表2 转速和进给速度变化范围

转速 (r/min)	1000 ~ 9000 (间隔 1000)
进给速度 (mm/min)	0.05 ~ 0.50 (间隔 0.05)

采用 Kistler 型测力仪对不同切削参数组合的 Z 向最大切削力进行检测,对原始检测数据进行低通滤波(带通频率为 20 ~ 400Hz),最终检测数据见图2。

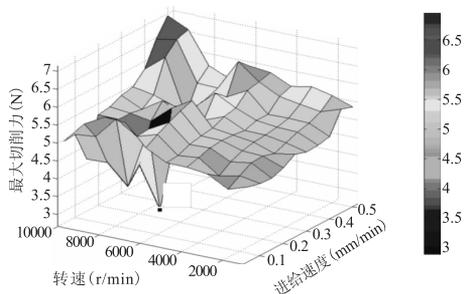


图2 Z向最大切削力的检测数据

根据实际检测数据可知:Z 向最大切削力基本符合随转速/进给速度变大而变大的趋势,变化范围均在同一个数量级以内;其次,在相对一致的变化趋

势内,出现了几个明显低位点,坐标分别为(0.2,6000,2.89)、(0.15,8000,3.58)、(0.2,8000,4.01)、(0.15,9000,4.14),均出现在相对较高的转速和中低进给速度的切削参数组合下。

#### (2) 微细铣削加工形貌分析

为了在微米级的进给加工中消除对刀误差,加工进刀是在第一次预加工形成的一道“犁沟”内二次进刀完成加工。着重对加工底部和近底部的两侧进行观测,几种不同加工参数下的典型形貌如图3所示。

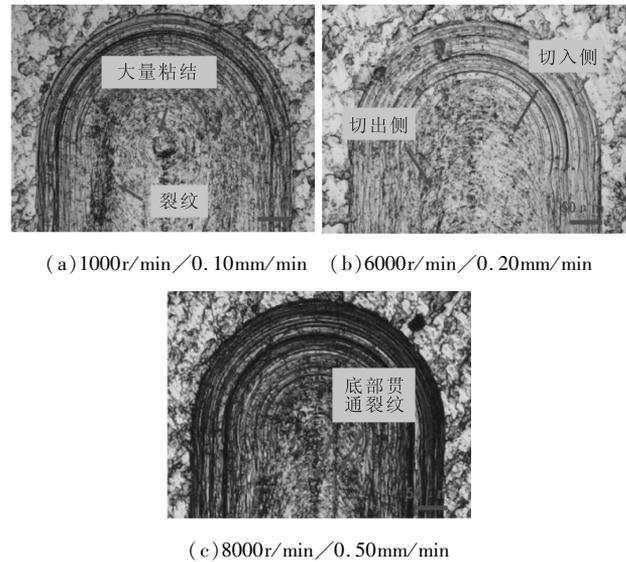


图3 微观形貌分析(转速/进给)

图3的3幅图代表了“低转速/低进给”、“较高转速/较低进给”和“较高转速/较高进给”几种典型加工参数下铍样品加工的形貌。对几种样貌的观察可以看出:

(1)在“低转速/低进给”下,在切入侧与切削区域的底部均出现明显的粘结,部分铍材料粘结沿刀痕产生的裂纹分布,未能有效去除,切出一侧明显可见大量裂纹片区的生成;

(2)“较高转速/较低进给”的工况对应图3中切削力较小的位置,在该工况下,切入区域的生成形貌光洁度相对较好,仅有切出侧出现极少量的裂纹,在切入侧基本实现了塑性域的加工;

(3)在“较高转速/较高进给”工作状态下,可以观察到沿刀纹产生了大量的裂纹,切入与切出侧均有较多较密集分布;值得注意的是其底部出现了几道贯通性的沿进给方向的长裂纹。

综上分析,在“较高转速/较低进给”的工况下,可以得到形貌较好、光洁度佳的表面,同时良好的加工表面也能和较低的切削力完全对应。

#### 4 镀材塑性域加工机理分析

经过研究,利用球头铣刀进行微细铣削加工,可以实现在“较高转速/较低进给”以及“低于临界切削厚度(试验为 $3\mu\text{m}$ )”的条件下实现镀材的塑性域加工。同时加工中脆塑转变的发生与加工区域内微细切屑的粘结和裂纹的快速扩展生成紧密相关,宏观上脆塑转变反应为切削力的突然下降<sup>[3]</sup>。

##### (1) 低转速/低进给加工机理分析

在“低转速/低进给”条件下,由于镀材料的硬度较高且断裂韧性较低,切削区域侧边和底面的裂纹在材料与刀具接触时已经产生,此时因为较低的材料去除速度,不断生成的裂纹难以随切屑带走,不断向侧面和底面扩展;同时一些微细的切屑也无法随主轴高速旋转产生气流或离心力带走<sup>[4]</sup>,在加工中受到来自刀具的较大挤压力粘附于已加工表面形成粘结团块,既降低了已加工表面质量,又加剧了刀具犁刮工件表面的摩擦力与切削区域局部受力的不均衡,导致即使在临界切削厚度以下也难以实现类似塑性材料的材料去除方式。

##### (2) 较高转速/较低进给加工机理分析

当转速得到提升,同时进给速度相对比较合理时,切削参数将到达一个平衡区域。此时,裂纹扩展速度将小于切屑流出速度,大部分新生成的裂纹随切屑被带走。同时随着转速增加,细小的切屑难以粘结在已加工表面,镀材将得到光洁度相对较好的加工表面。

在宏观上,由于粘结现象的消除,切削区域将成为光洁度较高的表面,大大降低刀具与材料的摩擦;同时,由于裂纹沿成型表面的扩展得到有效遏制,无论是底面还是侧边刀具的局部受力会更加均匀,所以微细铣削力也会明显降低。

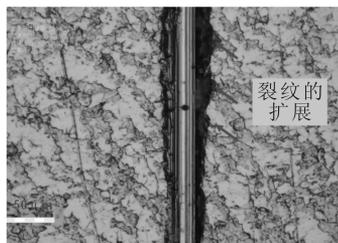


图4 裂纹的扩展

##### (3) 较高转速/较高进给加工机理分析

当转速与进给速度都急剧增加时,由于裂纹产生与扩张的速度大大增加(见图4),通过对已加工表面裂纹的观察,裂纹产生速度增大并迅速扩张,导

致加工表面质量快速恶化,最终表面裂纹广泛分布;更严重的是,随着裂纹开始向刀具正下方快速扩张,在切削深度最大的底部甚至出现了贯通性的裂纹(见图5)。

此外,由于切削区域的热量随着切削参数的增加剧烈上升,在成型表面底部等排热不畅的区域将会形成明显材料烧蚀,大大降低表面质量,切削模式快速向脆性加工转变。

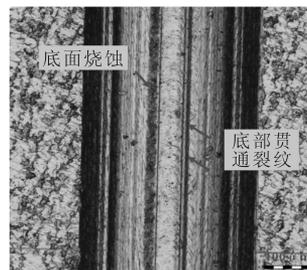


图5 切削用量过大造成的裂纹和烧蚀

#### 5 结语

结合加工参数的影响、法向切削力最大值的检测与加工表面形貌的分析表征,提出了“裂纹衍生扩展与微量切屑粘结”机理,并阐明了其对加工表面质量的影响,同时也说明了该机理对镀样品加工中脆塑转变的实际影响;通过较低进给速度控制裂纹的生成与扩展,并利用适当较高的转速排出切削区域中的微切屑,在微细铣削的切入侧实现了镀样品的塑性加工,得到了加工质量较好的成型面。

#### 参考文献

- [1]张鹏程,田黎明. 车削加工对镀组织与性能的损伤[J]. 稀有金属,2001,25(2):90-93.
- [2]Blake P N, Scattergood R O. Ductile-regime machining of germanium and silicon[J]. Journal of the American Ceramic Society,1990,73(4):949-957.
- [3]Takashi Matsumura,Takaharu Hiramatsu,Takahiro Shirakashi. A study on cutting force in the milling process of glass[J]. Journal of Manufacturing Processes,2005,7(2):85-89.
- [4]王亚男. 熔石英玻璃塑性域微铣削工艺基础及实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.  
第一作者:吴优,工程师,中国工程物理研究院材料研究所,621907 四川省江油市  
First Author: Wu You, Engineer, China Academy of Engineering Physics, Institute of Materials, Jianguyou, Sichuan 621907, China