

# 超声振动辅助车削高温合金和铝镁合金研究

徐英帅, 邹平, 王伟, 杨旭磊

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 针对 GH4169 镍基高温合金和 5A06 铝镁合金切削加工困难, 以及已加工表面质量和加工精度要求高等难题, 从切削原理及加工工艺入手, 采用超声振动方法设计超声振动车削加工系统. 利用该加工系统对 GH4169 和 5A06 两种合金材料做超声振动车削与普通车削的对比试验. 结果表明: 超声振动辅助车削高温合金和铝镁合金中工艺参数对已加工工件的表面粗糙度、表面形貌和切屑形态影响明显, 合理选择各工艺参数能够有效地改善加工质量, 使得超声振动车削的加工效果明显好于普通车削.

**关 键 词:** 超声振动车削; 工艺参数; 表面粗糙度; 表面形貌; 切屑形态

中图分类号: TG 506.5; TH 161

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2017)01-0095-06

## Investigation on Ultrasonic Vibration Assisted Turning of Ni-Based Superalloy and Al-Mg Alloy

XU Ying-shuai, ZOU Ping, WANG Wei, YANG Xu-lei

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: ZOU Ping, E-mail: pzou@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** For the machinability difficulty of GH4169 Ni-based superalloy and 5A06 Al-Mg alloy as well as the high demands of machined surface quality and machining precision, the ultrasonic vibration assisted turning machining system was designed utilizing the method of ultrasonic vibration, which proceeded with cutting principle and machining technology. The contrast test was conducted to compare ultrasonic vibration assisted turning with conventional turning for these two alloy materials. The results indicate that the technological parameters have obvious effect on the surface roughness, surface topography and chip morphology of machined workpiece when ultrasonic vibration assisted turning of Ni-based superalloy and Al-Mg alloy is conducted. Choosing reasonable technological parameters can promote efficiently the processing quality, and enable the machining effects of ultrasonic vibration assisted turning to be superior to that of conventional turning.

**Key words:** ultrasonic vibration assisted turning; technological parameter; surface roughness; surface topography; chip morphology

从加工质量、金属去除量、生产率以及设备使用率考虑, 车削加工仍是应用广泛、经济实用的机械加工方式<sup>[1]</sup>. 超声振动车削是超声振动与传统车削相结合的一种复合加工方法, 通过给刀具或工件施加高频小振幅超声振动来实现刀具与工件之间的周期性分离, 从而使传统切削发生根本变化, 能实现更好的加工效果<sup>[2-3]</sup>, 在难加工材料和难加工工序的加工中具有很高的应用价值<sup>[4-5]</sup>.

与传统车削相比, 超声振动车削能改善动态切削稳定性<sup>[5]</sup>、降低切削力<sup>[2-3]</sup>和表面粗糙度<sup>[6-7]</sup>、减小刀具磨损<sup>[5,7]</sup>及被加工工件的残余应力<sup>[8]</sup>等.

GH4169 的切削加工性能极差, 属于典型的难加工材料, 而 5A06 属于软性材料, 车削加工不易获得好的表面质量, 利用超声振动车削方法能解决这两种材料加工难的问题. 国内关于超声振动辅助车削高温合金和铝镁合金的研究还不是很

成熟.

本文在 CA6140 车床上建立了超声振动车削加工系统,并在不同的工艺参数条件下进行超声振动车削和普通车削试验,对比分析已加工工件的表面粗糙度、表面形貌和切屑形态情况,为高温合金和铝镁合金的超声振动车削加工的发展及现实应用提供理论支撑和试验基础.

# 1 超声振动车削加工系统

超声振动车削是在普通车削中刀具与工件相对运动的基础上,给刀具或工件施加超声振动的一种加工方法. 由于工件的大小和形状各不相同,因此给工件施加超声振动比较困难,而刀具的质量相对较轻,形状也比较固定,易于实现系列化. 所以本研究所设计的超声振动车削加工系统将超声振动施加在刀具上. 超声振动车削按施加振动的方向可分为纵向振动车削、横向振动车削、进给振动车削及复合振动车削. 本研究选用的是纵向振动车削方式,使刀具获得一定振幅的超声频机械振动,进而实现超声振动车削加工.

超声振动车削加工系统主要由超声振动系统和车床等组成. 其中超声振动系统主要包括超声发生器、超声换能器、超声变幅杆和刀具系统,工作原理如图 1 所示. 超声振动系统首先借助超声发生器转换 220 V 或 380 V 的交流电为 16 kHz 以上超声频率的电振荡信号,然后通过超声换能器形成同频率的机械振动,再利用超声变幅杆将该振动的振幅放大,使其在刀具的端部产生适合超声振动车削加工的机械振动幅值,并作用于工件表面. 本研究中根据设计要求选用美国必能信超声公司生产的 2000bdc 型超声发生器和超声换能器,依据半波长圆截面阶梯形变幅杆理论设计超声变幅杆,并设计专用螺杆将超声变幅杆与刀具系统紧固为一体.

超声振动车削加工系统是在一台 CA6140 型普通车床的基础上搭建的,需要设计安装超声振动系统的专用夹具,超声振动系统通过该夹具安装到机床的溜板上. 在专用夹具的设计中,除了考虑专用夹具能固定超声振动系统外,还要重点考虑刀具刀尖的高度问题. 超声振动车削加工中刀具刀尖的高度最好低于工件旋转中心,即机床主轴旋转中心一个振幅值,这样就可以实现当对刀具施加超声振动时刀尖正好处于工件的旋转中心处. 然而刀具刀尖调整到正好低于工件旋转中心一个振幅值是不可能的,允许存在一个很小的误

差. 超声振动系统和专用夹具连接组装后的三维结构如图 2 所示.

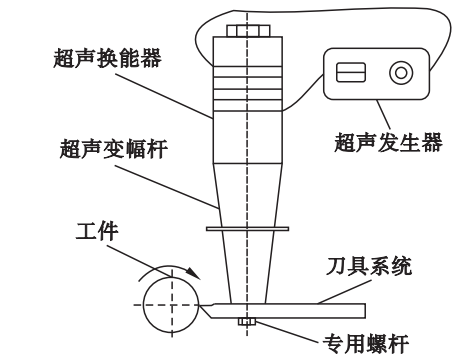


图 1 超声振动系统的工作原理  
Fig. 1 Working principle of ultrasonic vibration system

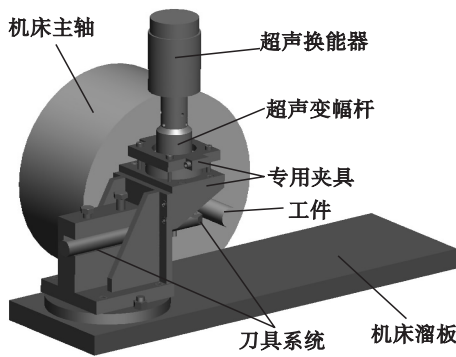


图 2 超声振动车削加工系统三维结构图  
Fig. 2 3D structure of ultrasonic vibration assisted turning machining system

加工系统的整体安装需注意以下几点:①为避免车刀受力不均刀具系统必须垂直安装;②本研究设计的是纵向超声振动系统,刀具的高频振动方向与主切削力方向一致,因此安装中应保证超声变幅杆和超声换能器的中心轴线与专用夹具水平面即车床水平面垂直. 超声振动车削加工系统的实物照片如图 3 所示. 在加工中利用车床主轴和机床控制系统来实现车削所需的旋转及进给运动,并结合超声振动来实现超声振动车削加工.

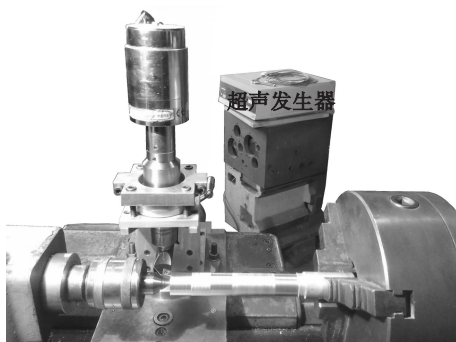


图 3 试验装置照片  
Fig. 3 Photograph of experimental setup

## 2 试验设计

车削试验在干燥的情况下进行. 工件材料为 GH4169 镍基高温合金(即 Inconel 718)和 5A06 铝镁合金. GH4169 具有较高的硬度和强度,其相对可切削性甚至达不到 45 钢的 1/5,是目前最难加工的材料之一. 5A06 中 Al 的含量较高,Al 的密度很小,质地比较软,属于黏性材料,这大大增加了铝镁合金车削的难度.

实现 GH4169 和 5A06 的高效加工,需要选择热硬性和耐磨性较好的刀具材料,并采用合理的刀具角度和工艺参数. 针对高温合金和铝镁合金的难切削性,分别选用 CCMT120408LF KC5010 型以及 CCMT120404HM YBM251 型硬质合金涂层刀具进行相应的试验研究. 刀具几何参数对加工质量、刀具耐用度有很大的影响,这两种型号的刀具几何形状及规格如图 4 所示.

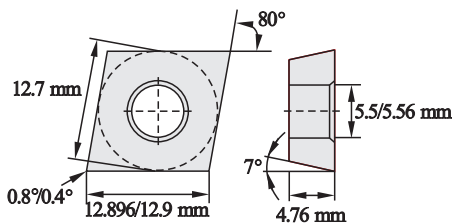


图 4 刀具几何形状及规格

Fig. 4 Geometry and specification of the tool

用在这项研究中的工艺参数主要包括切削参数和超声振动参数. 其中切削参数包括切削速度、切削深度和进给量;超声振动参数包括超声振幅和振动频率. 本试验中振动频率固定为 20 kHz,其他工艺参数和水平见表 1. 文中主要分析切削速度、切削深度、进给量和超声振幅对已加工表面和切屑的影响,从而可以有效地控制这些工艺参数之间的相互关系,最终实现优质高效加工.

表 1 工艺参数和水平

Table 1 Process parameters and levels

工艺参数	符号	单位	水平
切削速度	$v_c$	m/min	15, 18, 23, 28, 35, 42, 47, 52
切削深度	$a_p$	mm	0.05, 0.10, 0.15, 0.20
进给量	$f$	mm/r	0.08, 0.10, 0.15, 0.20
超声振幅	$A$	$\mu\text{m}$	0, 10, 15, 20, 23, 26, 30

## 3 结果与讨论

### 3.1 表面粗糙度

为研究切削速度对表面粗糙度  $R_a$  的影响规

律,在切削深度为 0.1 mm,进给量为 0.08 mm/r,超声振幅为 23  $\mu\text{m}$  的切削条件下,对 GH4169 和 5A06 做有无超声振动的切削试验. 已加工工件的表面粗糙度随切削速度变化的关系曲线如图 5 所示,图中 UAT 代表超声振动车削,CT 代表普通车削. 从图中可以看出,选择合适的切削速度能保证超声加工的表面粗糙度好于普通加工,并且在超声振动车削中 GH4169 和 5A06 的表面粗糙度随切削速度的增加都是先减小后增大. 由于铝镁合金相对较软,不易获得很好的表面质量,所以 5A06 的表面粗糙度整体上要明显高于 GH4169,并且 5A06 更适合在相对较高的切削速度下进行车削加工.

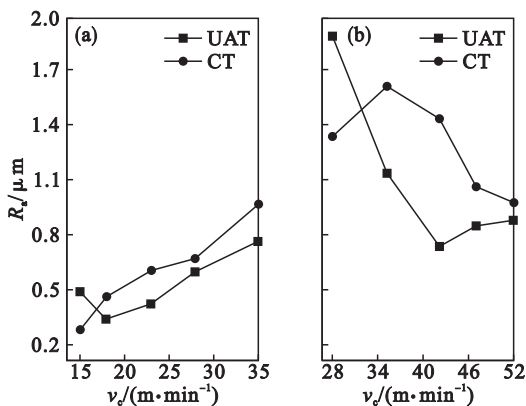


图 5 表面粗糙度随切削速度变化的关系曲线

Fig. 5 Relation curves between surface roughness and cutting speed

(a)—GH4169; (b)—5A06.

依据图 5 可知,高温合金的切削速度最好要大于等于 18 m/min,铝镁合金的切削速度最好要大于等于 35 m/min. 由于在切削速度较低时,单位面积上刀具的作用时间延长,使得刀具与已加工表面的摩擦增加. 另外,在超声加工中切削速度也不能过高,需要满足如下条件:

$$v_c < \frac{v}{3}, \quad (1)$$

$$v = 2\pi A f_0. \quad (2)$$

式中: $v_c$  为实际切削速度; $v$  为临界切削速度; $A$  为超声振幅; $f_0$  为振动频率. 当  $A = 23 \mu\text{m}$ ,  $f_0 = 20 \text{ kHz}$  时,由式(1)和式(2)计算可知,超声振动车削中切削速度应小于 57.8 m/min. 当切削速度较大时,由超声振动所产生的工件与刀具的分离作用减弱,会导致超声振动车削过程接近于普通车削. 因此超声振动车削存在一个最佳的切削速度范围,在此范围内施加超声振动的已加工工件的表面粗糙度要低于未施加超声振动的.

为了进一步研究切削深度对表面粗糙度的影



响规律,选取进给量为 0.08 mm/r,超声振幅为 23  $\mu\text{m}$ ,GH4169 的切削速度为 23 m/min,5A06 的切削速度为 42 m/min 时对这两种材料做有无超声振动的切削试验,试验结果如图 6 所示.从图中可以看出,超声振动车削与普通车削两种材料的表面粗糙度的整体变化趋势基本相同,GH4169 的表面粗糙度随着切削深度的增加先减小后增大,5A06 的表面粗糙度随着切削深度的增加而增大.但与普通车削相比,超声振动车削的表面粗糙度要明显低于普通车削.在超声振动车削中,GH4169 的表面粗糙度在切削深度为 0.05 mm 时接近普通车削,当切削深度从 0.1 mm 增加到 0.15 mm 时,表面粗糙度变化幅度不是很大.超声振动辅助车削 5A06 的表面粗糙度在切削深度为 0.05 mm 和 0.1 mm 时变化不大,在切削深度为 0.2 mm 时接近于普通车削.切削深度对表面粗糙度的影响主要是由其对切削力的影响而引起的,随着切削深度的改变会使切削力发生变化,较大的切削力更容易形成积屑瘤.另外,切削深度改变也会引起变化的加工表面变形及振动等.在加工中施加超声振动可以减小以上这些影响而获得较低的表面粗糙度.

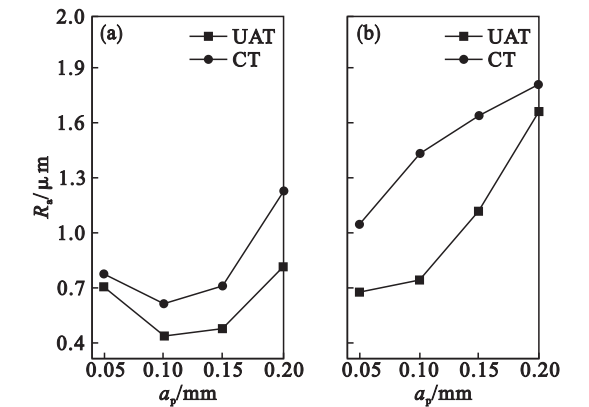


图 6 表面粗糙度随切削深度变化的关系曲线  
Fig. 6 Relation curves between surface roughness and cutting depth  
(a)—GH4169; (b)—5A06.

选取切削深度为 0.1 mm,切削速度和超声振幅与研究切削深度对表面粗糙度影响所选的参数相同,研究进给量对表面粗糙度的影响规律.表面粗糙度随进给量变化的关系曲线如图 7 所示.从图中可以看出,超声振动车削的表面粗糙度要明显好于普通车削.超声振动辅助车削 GH4169 时,表面粗糙度随着进给量的增加呈现先减小后增大的变化趋势,但当进给量从 0.08 mm 增加到 0.15 mm 时,表面粗糙度减小的幅度不大,几乎没

有变化.5A06 的表面粗糙度随着进给量的增加而增大.在车削加工中,随着进给量的增加切屑宽度增大,使得切屑的排出产生很大阻碍,切屑在刀具与工件表面之间堆挤易使切削系统发生颤振,造成已加工表面严重的缺陷.另外,较宽的切屑不易断裂而缠绕在工件上,也容易使刀具和已加工表面划伤,刀具损伤后会进一步破坏工件表面,所以在实际加工中应选择较小的进给量.由于 GH4169 在加工中切屑更容易断裂,不会出现切屑堆挤和缠绕的现象,所以进给量从 0.08 mm 增加到 0.15 mm 时影响不大.

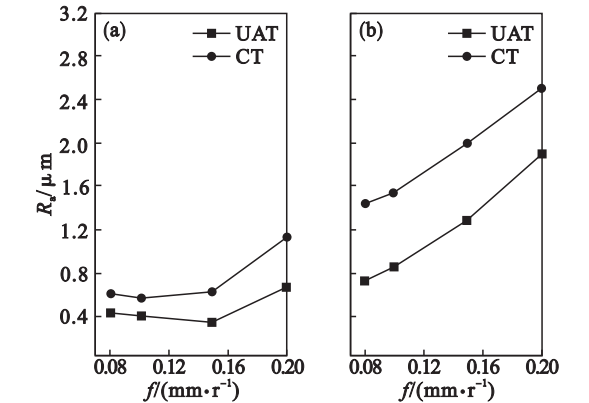


图 7 表面粗糙度随进给量变化的关系曲线  
Fig. 7 Relation curves between surface roughness and feed rate  
(a)—GH4169; (b)—5A06.

超声振幅对表面粗糙度也有很大影响,在切削深度为 0.1 mm,进给量为 0.08 mm/r, GH4169 的切削速度为 23 m/min, 5A06 的切削速度为 42 m/min 的切削条件下进行车削试验,得到如图 8 所示的关系曲线.从图中可以看出,超声振动车削的表面粗糙度随着超声振幅的增加先减小后增大,存在一个最佳的超声振幅范围使得超声振动车削的表面粗糙度低于普通车削.虽然从超声振动运动学来看,增加超声振幅,振动切削效果更能充分发挥,但在实际试验中,超声振动辅助车削 GH4169 在超声振幅为 30  $\mu\text{m}$  时,功率出现过载现象而无法正常运行,因此在超声加工中超声振幅不能过大.在大振幅下即使能正常运行也只能起到提高临界切削速度和加工效率的作用.超声振幅不能过大也不能过小,图 8 显示 GH4169 在超声振幅为 10  $\mu\text{m}$  和 26  $\mu\text{m}$  时表面粗糙度接近普通车削,超声振幅在 15 ~ 23  $\mu\text{m}$  范围时效果最佳,5A06 在超声振幅为 10  $\mu\text{m}$  和 30  $\mu\text{m}$  时表面粗糙度接近普通车削,超声振幅在 20 ~ 26  $\mu\text{m}$  范围时效果最佳.不同材料最佳超声振幅范围不同.

与普通车削相比,超声振动车削能获得较低表

面粗糙度的主要原因在于实现断续切削,即在一个振动周期实现工件与刀具的分离,进而降低工件与刀具之间的摩擦水平. 另一个原因是施加超声振动后系统稳定性得到提高. 此外,超声振动能量对工件材料产生的声软化作用也可使表面粗糙度降低.

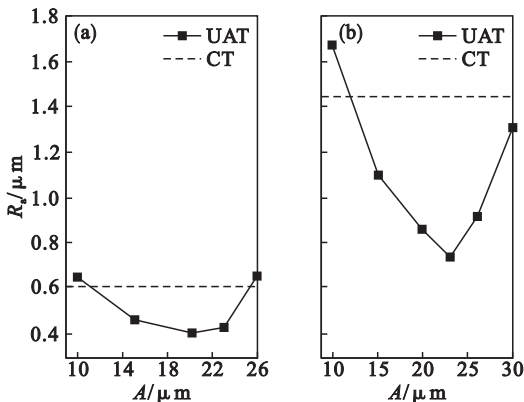


图 8 表面粗糙度随超声振幅变化的关系曲线  
Fig. 8 Relation curves between surface roughness and ultrasonic amplitude  
(a)—GH4169; (b)—5A06.

### 3.2 表面形貌

在相同切削条件下,对 GH4169 和 5A06 做有无超声振动车削试验,已加工表面超景深光学图像如图 9 所示.

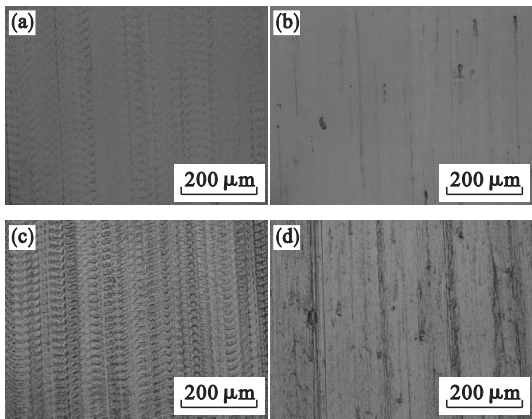


图 9 工件表面形貌  
Fig. 9 Surface topography of workpiece  
(a)—GH4169 超声振动车削; (b)—GH4169 普通车削;  
(c)—5A06 超声振动车削; (d)—5A06 普通车削.

从图 9 能明显看出,超声振动车削的工件表面形貌与普通车削差别很大. 由于超声振动的辅助作用,超声振动车削的已加工表面出现了类似于车轮一样的振痕,表面布满纵向走刀刀纹及大量横向条纹,形成凹凸的网格状. 尽管加工表面的纹路错综复杂,但是切痕的大小及整体分布较为均匀,切痕间距也比较小,表面看起来比较细腻、匀称. 由于 GH4169 硬度较大,表面振痕相比

5A06 不是很明显.

普通车削加工后所得到的已加工表面条纹很不规则,各切痕区别明显、大小不均,除走刀痕外还残留了刀具在工件表面形成的沟槽. 与 GH4169 相比,5A06 的表面条纹更明显,表面有明显的沟槽缺陷、划痕和积屑瘤. 上述现象主要是因为刀尖处的积屑瘤流入刀具与工件的接触区,工件表面形成“犁沟”现象,并且积屑碎片容易嵌入到工件表面产生硬质点,使表面变得粗糙. 施加超声振动后,这些不利现象得到明显改善,加工表面质量显著提高.

超声振动车削能获得较好的表面形貌主要是因为加工中施加了超声振动,刀具以一定的振动频率和超声振幅处于超声振动状态. 切削时刀具的切削方向在一个振动周期内不断变化并往复地进行车削加工,切屑会被振动中的刀具所截断. 另外,由于刀具与工件的间断接触,材料在受到剪切撕裂发生弹性变形后,会有暂时的缓解过程,减轻了材料的剪切变形程度,并且加工中产生的微裂纹还没扩展就被下一个切削过程的刀具所截断,使得表面凹坑的大小有所减小,因此容易获得较好的表面质量.

### 3.3 切屑形态

金属的车削加工过程实际上是材料被去除形成切屑的过程,加工中的摩擦情况可以通过切屑的几何形状反映出来,因此切屑形态对已加工表面质量和加工精度有很大影响. 有无超声振动状态下车削 GH4169 和 5A06 所得到的切屑形态的超景深光学图像如图 10 所示.

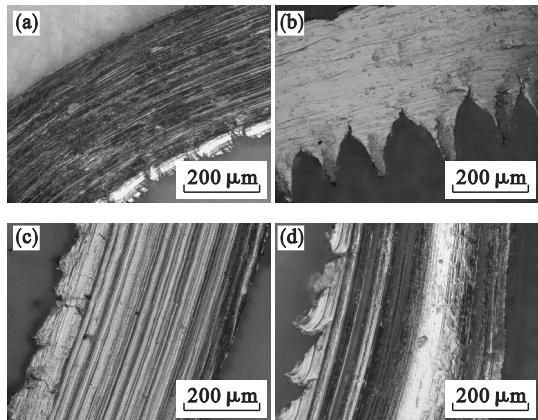


图 10 切屑形态  
Fig. 10 Chip morphology  
(a)—GH4169 超声振动车削; (b)—GH4169 普通车削;  
(c)—5A06 超声振动车削; (d)—5A06 普通车削.

通过图 10 可以看出,普通车削的切屑边缘带有锯齿状毛刺,毛刺较大且比较尖,容易划伤工件

表面,破坏已加工表面质量.施加超声振动后边缘锯齿状毛刺现象得到明显改善,形成较小且平滑匀称的毛刺,因此可以获得更加优良的已加工表面.另外,切屑边缘锯齿的形成频率很高,不断滑擦和冲击刀具使之产生应力和温度冲击,在连续冲击载荷的作用下,刀具易形成微裂纹、磨损,甚至破损<sup>[9]</sup>.

为进一步研究切屑形态,将与刀具接触的切屑表面放大,如图 11 所示.从图中可以看出,普通车削所得到的切屑表面特别粗糙,表面纹路不规则,同时出现明显的沟槽和深坑.普通车削所产生的这种带有毛刺且不匀称的切屑对高质量加工非常不利,容易导致切削区摩擦不均,进而产生高温、大切削力,以及高的再生颤振和快的刀具磨损<sup>[2,5]</sup>.超声振动车削得到的切屑表面更加平整、均匀,并且能看出规则的超声振痕,表明超声加工过程平稳,排屑相对顺畅,摩擦系数较小.

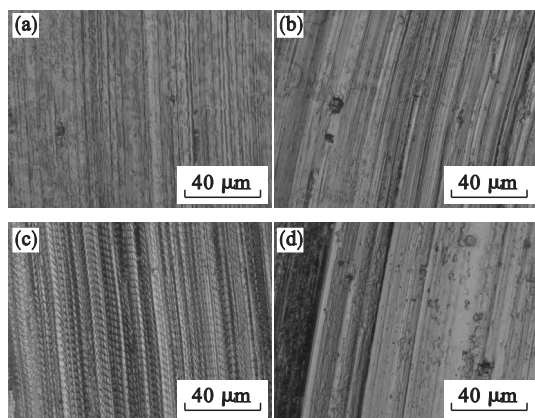


图 11 切屑表面  
Fig. 11 Chip surface

(a)—GH4169 超声振动车削; (b)—GH4169 普通车削;  
(c)—5A06 超声振动车削; (d)—5A06 普通车削.

## 4 结 论

1) 当选择合适的工艺参数车削加工 GH4169 和 5A06 时,超声振动车削的表面粗糙度情况要明显好于普通车削.车削不同工件材料的最佳工艺参数范围有所不同,对于本研究中所建立的超声振动车削加工系统,GH4169 和 5A06 两种材料都更适合选择较小的切削深度和进给量,但 GH4169 更适合选择相对较小的切削速度和超声振幅,而 5A06 更适合选择相对较大的切削速度和超声振幅.

2) 采用超声振动车削和普通车削方式加工

GH4169 和 5A06 时,已加工表面形貌差别很大.超声振动车削后的工件表面条纹相对复杂,切痕大小均匀,切痕间距较小,整体分布匀称细腻,外表成凹凸的网格状,表面划痕、沟槽缺陷、积屑瘤、积屑碎片嵌入已加工表面和工件表面“犁沟”现象得到明显改善,得到了比普通车削更好的表面形貌.

3) 普通车削 GH4169 和 5A06 的切屑边缘带有锋利的锯齿状毛刺,容易划伤工件表面,破坏已加工表面质量.超声振动车削可以得到更加平整、均匀的切屑,而且切屑边缘锯齿状毛刺现象得到明显改善,有助于获得更好的加工效果.

## 参考文献:

- [1] Xavier M A, Adithan M. Determining the influence of cutting fluids on tool wear and surface roughness during turning of AISI 304 austenitic stainless steel [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(2): 900–909.
- [2] Patil S, Joshi S, Tewari A, et al. Modelling and simulation of effect of ultrasonic vibrations on machining of Ti6Al4V [J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(2): 694–705.
- [3] Muhammad R, Hussain M S, Maurotto A, et al. Analysis of a free machining  $\alpha + \beta$  titanium alloy using conventional and ultrasonically assisted turning [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(4): 906–915.
- [4] Zou P, Xu Y S, He Y, et al. Experimental investigation of ultrasonic vibration assisted turning of 304 austenitic stainless steel [J]. *Shock and Vibration*, 2015, 2015: 1–19.
- [5] Nath C, Rahman M. Effect of machining parameters in ultrasonic vibration cutting [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2008, 48(9): 965–974.
- [6] Babitsky V I, Kalashnikov A N, Meadows A, et al. Ultrasonically assisted turning of aviation materials [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 132(1/2/3): 157–167.
- [7] Koshimizu S. Ultrasonic vibration-assisted cutting of titanium alloy [J]. *Key Engineering Materials*, 2009, 389/390: 277–282.
- [8] Mitrofanov A V, Babitsky V I, Silberschmidt V V. Finite element simulations of ultrasonically assisted turning [J]. *Computational Materials Science*, 2003, 28(3/4): 645–653.
- [9] 肖茂华,何宁,李亮,等.陶瓷刀具高速切削镍基高温合金沟槽磨损试验研究[J]. *中国机械工程*, 2008, 19(10): 1188–1192.  
(Xiao Mao-hua, He Ning, Li Liang, et al. Experimental studies on notch wear for high speed machining of nickel-based superalloy with ceramic tools [J]. *China Mechanical Engineering*, 2008, 19(10): 1188–1192.)