

振动切削对难切削材料加工及提高刀具使用寿命的研究

Research of Vibration Pulse Cutting for Difficult-to-Cut Material and Increasing Life Cycle of Cutting Tool

华东理工大学机械与动力工程学院 肖 民



肖 民

华东理工大学机械与动力工程学院副教授, 2003 年在日本宇都宫大学获博士学位。主要从事振动切削、难切削加工、切削理论和再生颤振发生机理等研究工作, 在国际重要期刊上发表多篇论文。

航空发动机不仅要在高温、高压、高转速和高负荷的环境中长期反复地工作, 而且还得具有重量轻、体积小、推力大以及使用安全可靠等特点。因此, 各类航空零部件材料也普

在加工不锈钢、淬硬钢和高温合金等难切削材料时经常采用一种振动切削的加工方法来化难为易, 提高被加工材料的可加工性。

遍具有高硬度、高强度、高韧性和高耐磨性的特点, 并且还大量采用整体薄壁结构或长径比大的小零件。对于这类航空难切削材料普遍具有的高强度和低刚度构件, 要求刀具切削刃必须具有足够的强度, 并且刀尖参与切削部分必须锋利。所以, 此类刀具一般采用正的刀具前角和尽可能小的刀尖角圆弧半径, 这样才能防止加工过程中大的变形和切削颤振, 产生少的切削热。但是, 锋利的刀具又由于刀刃强度的下降容易引起刀具崩刃, 造成刀片涂层脱落。

由于航空高温合金材料的导热系数一般很小, 在锋利的刀尖处积聚的大量切削热在刀具崩刃后将很快进入刀具急剧磨损阶段, 所以存在加工难度大, 甚至无法进行加工的问题。

振动切削在难切削材料加工方面的优势

在加工不锈钢、淬硬钢和高温合金等难切削材料时经常采用一种振动切削的加工方法来化难为易, 提高被加工材料的可加工性。日本宇都宫大学隈部淳一郎教授在 20 世纪 60 年代完成了对超声振动切削技术的大量开创性工作, 他的试验表明, 刀具上施加一定频率和振幅的超声波振动, 可以改变传统切削的切削性质, 改善工艺加工效果, 所以他把该技术称之为振动切削 (Vibration Pulse Cutting)。图 1 是振动切削产生断续切削的原理图, 具有超声波振动的刀具对着以切削速度为 v 的工件左右振动, 使刀具的前面周期性地接触和脱离工件。由于超声波

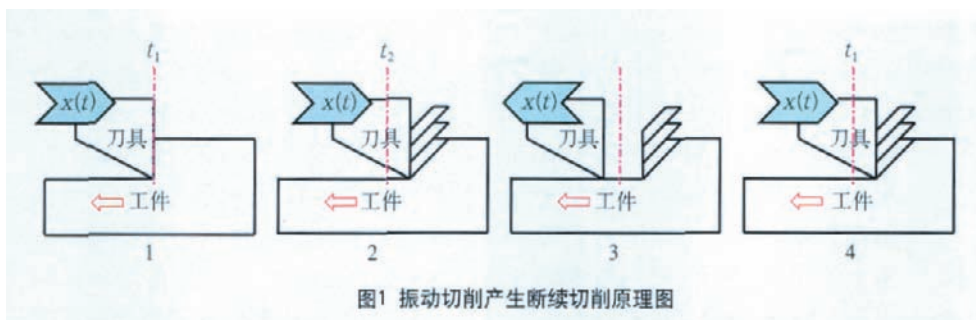


图1 振动切削产生断续切削原理图

的断续切削力使振动切削以一种颤振抑制机理的方式进行加工,可以达到降低切削力和切削热、提高工件加工质量和刀具使用寿命、实现高精密加工的目的。日本名古屋大学社本英二教授和日本多贺电气株式会社合作,采用金刚石刀具的椭圆振动切削,加工出的高硬度、高耐磨的钨钢(HRC60)外圆和端面,通过椭圆振动切削不但提高了平行度、垂直度与同心度,而且取得了纳米级“镜面”加工表面,其表面粗糙度可达5nm。多种试验结果表明,振动切削技术在相当大的程度上可以解决难加工材料切削中很多关键的技术问题,与传统切削技术相比有着明显的优势。

振动切削中选用适当的刀具圆弧半径对难切削材料加工

笔者先前提出了由二元微分方程式表示的再生型切削颤振模型,而振动切削模型则通过超声波断续切削力替代传统切削模型中的连续切削力来实现切削加工,该切削模型已通过试验得到了验证。针对航空零部件经常采用的长径比大的低刚度零件的情况,通过再生颤振切削模型对传统切削以及振动切削的颤振发生机理进行了数字仿真计算,并对2种加工方法的切削稳定性进行了比较。仿真结果显示,传统切削在刀具和工件之间产生的振动振幅随着主轴回转数的增加而逐渐变大。因此,传统切削方法在加工低刚度零件时容易发生再生颤振,而振动切削的振动振幅将随着主轴回转数的增加而逐渐变小,显示了振动切削即使在加

工低刚度零件时仍可有效地抑制再生颤振,从理论上证明了振动切削是一种比传统切削具有更高稳定性的加工方法。由于振动切削形成的颤振抑制机理,可以预测的最大振动振幅被限制在第一转的 $4.3\mu\text{m}$ 内,如果没有刀具异常磨损等情况的发生,振动切削的表面粗糙度可能达到 $R_y=4.3\mu\text{m}$ ($R_a\approx 1\mu\text{m}$)。

振动切削是一种断续切削力加工,这将大大减弱由于刀具的强度而造成的加工精度不稳定的问题。在仿真计算时,再生效果假定为刀具前一次切削形成的表面在相继的后一次切削时被完全重复地切削。而实际的车削过程往往是前一次留下的波纹未必在下一一次切削时完全被切削。为了反映切削的重叠部分对再生效果影响的大小,用重叠系数 μ 来表示已加工表面和待加工表面之间切削的有效宽度所占的比例。重叠系数的数值一般在 $0 < \mu < 1$ 之间变化,当 μ 的数值不为0时表明任何切削加工都有可能发生再生型颤振。试验结果已经表明了重叠系数主要由刀具圆弧半径及主偏角的大小来决定,当主偏角保持不变时,刀具圆弧半径越小重叠系数也就越小。对于本试验采用的长径比大的低刚度零件,由仿真结果可知,传统切削是一种易发生再生型颤振的加工机构,应采用小的刀具圆弧半径避免再生

颤振的发生。然而,仿真结果也表明了振动切削是即使在重叠系数为1时仍然形成颤振抑制的一种机构,因此,在振动切削中可以考虑采用较大的刀具圆弧半径来解决难切削材料加工中的再生颤振和刀具强度这两大难题。笔者使用硬质合金

刀具对不锈钢及耐热合金钢的振动切削试验表明,采用不同大小的刀具圆弧半径对刀具的使用寿命有着截然不同的效果。当选用适当的刀具圆弧半径($r=0.2\text{mm}$)时,刀具的使用寿命得到了大幅度的提高,其表面粗糙度($R_y=4.7\mu\text{m}$)也达到了与预测值($R_y=4.3\mu\text{m}$)近似的数值。

振动切削中刀具磨损的在线监控提高刀具的使用寿命

笔者最近设计了一种在线监控加工中刀具与工件间的振动信号,并以此来调整切削参数的加工方法。下面首先介绍该加工方法的理论依据,其次通过试验确认该理论的正确性以及所带来的加工效果。在金属切削过程中随着切削时间的增加,刀具在正常磨损时实际切削的刀具圆弧半径将发生变化。图2显示了刀具磨钝前后2种不同大小的刀具圆弧半径对再生效果和切削力的影响。图中把总切削力分解为切削力 F_c 、背向力 F_r 以及进给力 F_f 3个互相垂直的切削分力。图2(a)是新刀具刀尖或重新刃磨后的刀具圆弧,这时圆弧半径较小,最大切削角 C_s 与主偏角 K_r

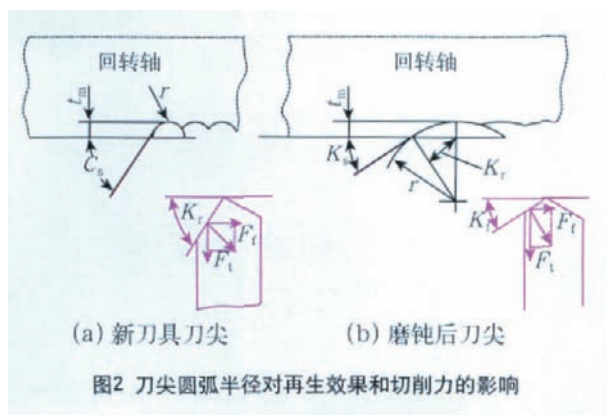


图2 刀具圆弧半径对再生效果和切削力的影响

相等,对3个方向上的切削分力的影响由主偏角来确定。图2(b)是刀具磨损后增大的刀尖圆弧半径,这时的最大切削角 C_s 由下式来确定:

$$C_s = \arccos \frac{r - t_m}{r}$$

式中, r 代表刀尖圆弧半径的大小,如果切削深度 t_m 为0.05mm,刀尖圆弧半径从0.2mm增加到1mm时,最大切削角将从 $41^\circ 25'$ 减少到 $18^\circ 12'$ 。这个增大的刀尖圆弧半径虽然可以改善刀具的散热条件,增强刀头的强度,降低加工的表面粗糙度,但是其背向切削分力也将迅速增大,切削变形也会增大,容易使切削系统失去稳定,诱发切削颤振,最终限制了刀具使用寿命。

从上面的计算还可以知道,刀尖圆弧半径是通过一定范围内的切削深度大小对背向切削力产生影响的。如果切削深度相对于刀尖圆弧半径是一个较小的量,则对背向力影响显著,这时刀尖圆弧半径的大小对切削力和切削颤振的影响就不能忽略。反之,如果切削深度相对于圆弧半径是一个较大的量,则对切削力的

影响不大,3个方向上的切削分力近似地由主偏角来确定。另外,前一部分的理论分析和试验结果已经表明,振动切削可以允许使用比传统切削更大的刀尖圆弧半径,当使用适当的刀尖圆弧半径时不但提高了切削的稳定性,而且获得了更高精度的加工表面。但是,金属切削过程中由于刀具的正常磨损,实际切削的刀尖圆弧半径将会逐渐变大,并随着切削时间的增加,背向切削力将不断增大,工件与刀具之间的振动也将随之加大。当刀尖圆弧半径达到一定值时,即使是稳定性高的振动切削加工方法也仍会发生颤振。

这一试验结果也反映了切削颤振形成的基本规律和预兆特征,即切削从平稳走向失稳的变化过程中,切削振动幅值或加工精度是由一较小的振动幅值逐渐转变为一较大的振动幅值,当切削振动幅值超过 $10 \sim 15 \mu\text{m}$ 时,切削颤振就容易发生。从这些讨论中还可以发现,如果整个切削过程中刀具都选择在适当大的刀尖圆弧半径条件下加工,那么刀具和工件间的切削振动将变得更小,

并有可能在预测振动幅值($R_y = 4.3 \mu\text{m}$)附近加工。

图3显示了在线监控切削振动信号,调整切削参数的加工方法。该加工方法对振动信号的处理时间短、控制方法简单,可以起到快速控制响应的控制效果。通过在线监控,使切削振动信号始终维持在一较小的振幅,对刀具的损伤较小,这样可以防止较大振动的出现,达到预防性抑制切削颤振、降低表面粗糙度以及最大限度延长刀具使用寿命的效果。

制定的切削振动判别阈值来调整加工切削深度,这一调整可以避免出现由刀具磨损带来的相对过大的刀尖圆弧半径,达到减小背向切削分力和切削振动振幅,最大限度延长刀具使用寿命的目的。由于该方案对振动信号的处理时间短、控制方法简单和响应速度快,可以起到预防性抑制切削颤振的效果。

通过试验可知,以上讨论的3种不同的加工方法在采用硬质刀具对难切削材料不锈钢SU S304振动切削时的结果为:当采用锋利刀尖的圆弧半径($r=0.02\text{mm}$)时,被加工材料在较短的切削长度内出现了加工精度恶化的现象,这将在很大程度上影响刀具的使用寿命;当选用适当大的刀尖的圆弧半径($r=0.2\text{mm}$)时,切削长度及加工精度得到了大幅度的提高,刀具使用寿命也得到了很大的提高;当采用在线监控切削振动信号、调整切削参数的加工方法时,整个加工过程不仅没有出现切削颤振,而且加工精度($R_y \approx 5 \mu\text{m}$)被维持在与预测振幅值($R_y = 4.3 \mu\text{m}$)相近的数值,同时刀具使用寿命也获得了最大限度的提高。

结束语

经过对切削颤振生成机理的探讨,提出了基于切削模型的切削振幅判别阈值,实施在线监控振动信号、调整切削深度的加工方法。该加工方法对振动信号的处理时间短、控制方法简单,可以起到快速控制响应的控制效果。通过在线监控,使切削振动信号始终维持在一较小的振幅,对刀具的损伤较小,这样可以防止较大振动的出现,达到预防性抑制切削颤振、降低表面粗糙度以及最大限度延长刀具使用寿命的效果。

注:本文有参考文献9篇,因篇幅所限未能一一列出,如有需要请向本刊编辑部索取。(责编 玉龙)

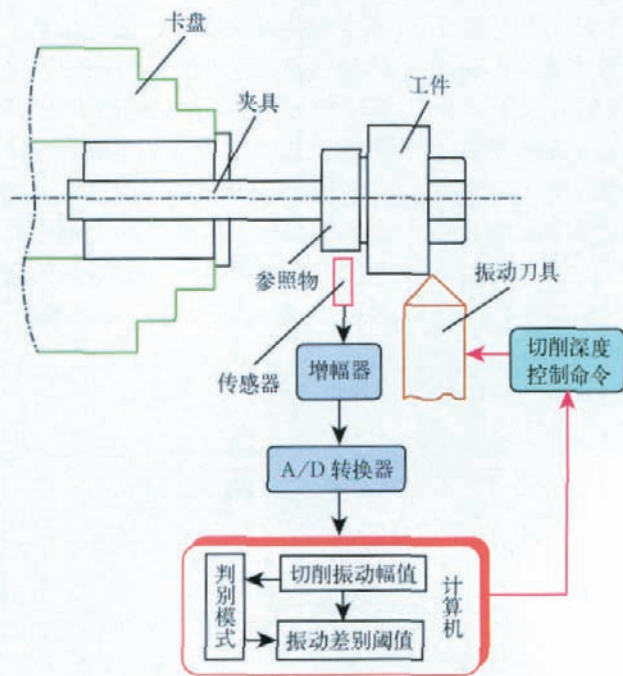


图3 在线监控切削振动信号调整切削参数原理图