

硬质合金刀具高速铣削 钛合金技术

High-Speed Milling of Titanium Alloy With Carbide Alloy Tool

南京航空航天大学机电学院 徐九华
南京农业大学工学院 耿国盛



徐九华

南京航空航天大学长江学者特聘教授、机电学院教授、博士生导师、副院长。在难加工材料高效精密切削与磨削理论及应用、超精密加工技术等方面的研究中均有突出贡献。发表学术论文150余篇,其中被SCI、EI收录90篇。

钛合金具有比强度高、耐热性和耐腐蚀性好等优良性能,不仅是现代航空航天工业中不可缺少的结构材料,而且在造船、化工等领域也获得了广泛的应用^[1-3]。同时,钛合金的热导率低、弹性模量小、化学活性高,易导致刀具的严重磨损,是一种典型的难加工材料。

与结构钢、不锈钢和高温合金相比,钛合金对表面损伤和缺陷具有更大的敏感性。钛合金在使用过程中,曾出现过许多断裂事故,其中绝大多数都与疲劳断裂有关,而钛合金零件的疲劳抗力对零部件的表面完整性特别敏感。因此,加工表面完整性及其对零部件使用性能的影响是目前钛合金零部件的制造者和使用者最关心的课题之一。

在航空工业中,钛合金零件成品重量与毛坯重量之比一般都低于20%,多数情况下,毛坯材料的绝大部分要被当作切削余量去除掉。钛合金的切削加工量大,加上钛合金固有的难加工特性,使钛合金零件的加工时间长,加工成本高,已经远远超过了原材料本身的成本。另外,与结构钢、不锈钢和高温合金相比,钛合金对表面损伤和缺陷具有更大的敏感性。钛合金在使用过程中,曾出现过许多断裂事故,其中绝大多数都与疲劳断裂有关^[4],而钛合金零件的疲劳抗力对零部件的表面完整性特别敏感。因此,加工表面完整性及其对零部件使用性能的影响是目前钛合金零部件的制造者和使用者最关心的课题之一。

由于上述问题的存在,传统的切削加工方式已经越来越显示出力不从心的迹象。具体表现为:加工效率低下;刀具磨损严重;加工精度和表面质量不高,从而需要大量费时费力的后续加工工序进行处理等。为解决这些矛盾,国内外学者进行了大量研究,高速切削被认为是提高钛合金加工效率、改善加工质量和降低生产成本的有效手段。M. Nouari^[5]和R. Komanduri^[6]等对高速切削钛合金的刀具磨损机理和切屑形成机理进行了研究。日本的Narutaki^[7]对Ti-6Al-4V合金的切削力和切削温度进行了比较全面的研究,认为高速切削时切削力几乎不随速度的提高而发生变化,而切削热大部分被切屑带走,来不及传入工件,所以工件的温

升较低。在国内,南京航空航天大学、山东大学等单位也对钛合金高速切削进行了较多的研究,验证了高速切削是提高钛合金加工效率和质量的有效途径。

本课题对钛合金高速铣削的切削力、切削温度、刀具磨损和加工表面完整性等方面进行了研究。以促进钛合金高速切削的推广和应用,满足现代航空制造业生产的需要。

高速铣削钛合金的切削力和切削温度

切削力和切削温度试验在 Mikron UCP710 五坐标高速加工中心上进行,采用 Kistler9265B 动态测力仪及 Kistler5019 电荷放大器对切削力进行测量,采用夹丝半人工热电偶方法对切削温度进行测量。试验用刀具为 Walter WMG40 硬质合金机夹刀片,工件材料为钛合金 TA15,热处理状态为退火。采用单因素试验,考察不同铣削速度下切削力和切削温度的变化规律。其他切削条件为:轴向切深 $a_p=6\text{mm}$,径向切深 $a_e=1\text{mm}$,每齿进给量 $f_z=0.1\text{mm/z}$ 。图1为典型的切削力信号图以及后刀面磨损 $VB=0.15\text{mm}$ 时的切削力与铣削速度关系曲线。切削力的方向定义为:进给方向为 X ,铣刀径向切深方向为 Y ,刀具轴向为 Z 。可以看到在此范围内, F_x 和 F_z 变化不大,而 F_y 随切削速度的提高略有下降。试验和理论表明:一方面随着切削速度的上升,两个因素会导致切削力的增加。首先是由断续切削造成的切削力冲击和动态切削力的数值会增加;其次,材料的应变硬化程度严重,导致剪切区变形抗力增加。另外一方面,切削速度上升导致的切削温度上升也会使被加工材料软化,使切削力减小。所以,切削速度对切削力的影响,要看这两方面综合作用的结果。当刀具后刀面磨损达到一定程度时,随着切削速度的增加,由温度

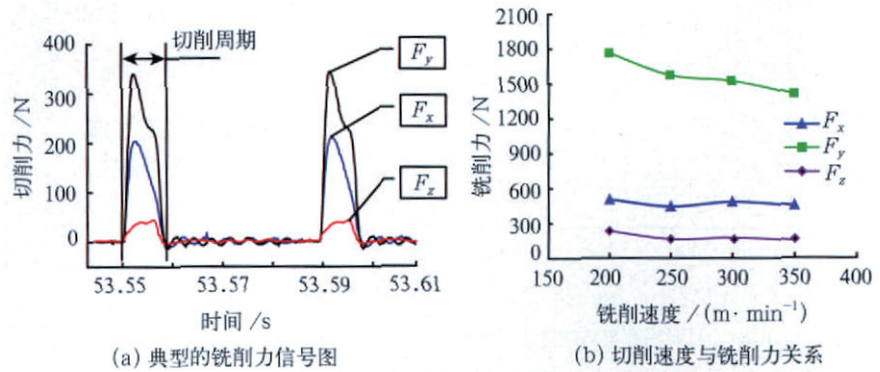


图1 典型的铣削力信号及铣削力与切削速度关系图

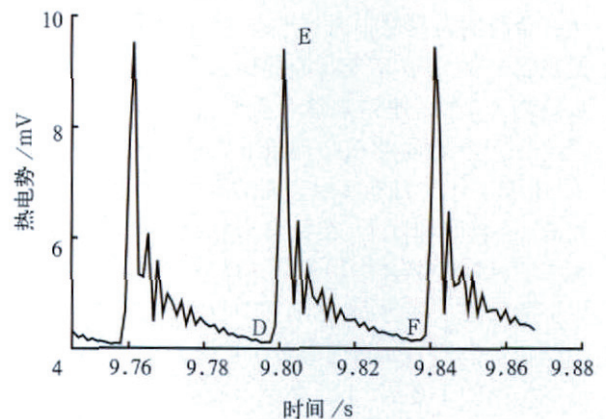
升高所导致材料软化影响占主导地位,其作用超过动态切削力增加和应变硬化增加两方面的影响,所以总的切削力呈下降趋势。

典型的铣削温度热电势信号及 50 ~ 550 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ 切削速度范围内的切削温度与铣削速度的关系如图2所示。切削温度随铣削速度增加有一直上升的趋势,但是在不同的速度范围内,切削温度上升的程度是不同的。在较低的速度范围内,温度随切削速度而上升的趋势较快,而在较高的速度范围内,温度随切削速度而上升的趋势变缓。这一现象产生的原因在于,随着切削速度的增加,传入切屑的热量比例增加,更多的热量被切屑带走;而传入工件和刀具的热量的比例减小,相应的刀具和工件的温度升高也不明显。

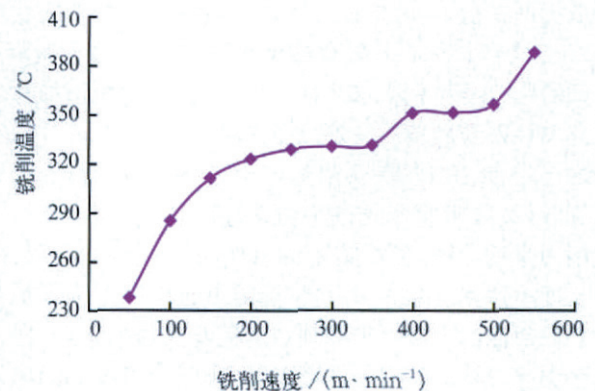
高速铣削钛合金的刀具磨损

钛合金高速铣削刀具磨损机理和刀具耐用度是生产过程中较受关注的问题。图

3为磨钝标准 $VB=0.3\text{mm}$ 的情况下,刀具耐用度随切削速度的变化关系。随着铣削速度增加,刀具切削时间下降较快。在 200 ~ 250 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度范围内时,刀具寿命下降很快;铣削速度继续增加,刀具寿命的下降趋势有所减缓。在 200 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度下,刀具寿命超过 120 min 。



(a) 典型铣削温度热电势信号



(b) 切削温度与铣削速度的关系

图2 典型铣削温度热电势信号及切削温度与铣削速度的关系图

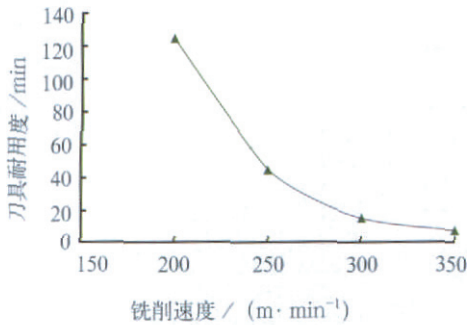


图3 刀具耐用度与铣削速度的关系



图4 硬质合金刀具磨损微观形态

图4为硬质合金刀具高速铣削钛合金时的刀具磨损微观形态(图中黑色部分为未被完全腐蚀的钛合金粘结物)。在高速铣削钛合金时,钛合金在刀具表面的粘结现象非常严重,由于工件与刀具接触表面的温度较高,且温度梯度大,在钛合金粘结和温度梯度的综合作用下,刀具将产生扩散磨损。一方面,粘结在刀具上的钛合金中的Ti元素向刀具中扩散,形成粘结的TiC层, TiC粘结层脱落时,会带走一部分刀具材料。另一方面,刀具中的C向高温区扩散, Co向低温区扩散,在刀具和工件的接触面上形成富C贫Co区,造成WC颗粒间的粘结强度下降,表层脆化,从而引起WC颗粒脱落。另外,铣削时的热冲击会使刀具切削刃附近产生梳状裂纹,裂纹垂直于切削刃方向,沿切削刃平均分布,裂纹间距约100 μ m,长度可达到0.5mm,并且贯穿前刀面和后刀面。当裂纹扩展到一定程度,会引起刀具切削刃的强度下降,从而使刀具材料被粘结其上的钛合金撕裂和脱落,使切削刃变形和钝化。所以,铣削钛合金时的刀具磨损是扩散

磨损、粘结磨损和热冲击相互作用、相互促进的结果。

高速铣削钛合金的表面完整性

在50~300m/min的速度范围内,加工表面粗糙度 R_a 的值较低,并且变化很小,分布在0.1~0.3 μ m之间。表面粗糙度随后刀面磨损的增加而增大。在刀具磨损初期,粗糙度变化不大;但当后刀面磨损较大时,粗糙度会显著增加。为保证获得良好的表面粗糙度,应该控制刀具的后刀面磨损量。

从各种切削速度下加工表面层的金相组织来看,铣削钛合金TA15的加工表面层金相组织变化并不明显,也未发现晶粒沿刀刃运动方向被拉伸的现象。同时,无论是常规速度还是高速铣削TA15,所产生的加工硬化均不严重,铣削速度的提高并不会造成显著的加工硬化。

对残余应力的分析结果表明,在试验所用各种切削速度下,已加工表面的残余应力均为压应力。压应力的大小约在-300~-30MPa之间。随切削速度的提高,残余压应力的绝对值有所降低;径向切深和每齿进给量增加时,残余压应力的绝对值略有升高,但径向切深或每齿进给量增加,可能导致刀具磨损加快、加工表面粗糙度和加工硬化的升高,所以必须将其控制在适当的范围。

为了更加准确和可靠地分析切削速度对加工零件表面质量和疲劳性能的影响,进一步对各种切削速度下铣削加工的钛合金试样进行了疲劳性能的对比试验。疲劳试验采用轴向应力控制,应力比 $R = 0.1$ 。图

5为800MPa和900MPa两种应力水平下,试样中值疲劳寿命的对比。在50~100m/min的切削速度范围内,试样的疲劳寿命随切削速度的提高而明显上升。这说明与常规切削速度相比,高速切削钛合金可以获得更好的加工表面。

结果分析与讨论

随着铣削速度的提高,铣削钛合金的切削力有下降的趋势,而切削温度相应升高。在较高的切削速度下,由于更多的切削热被切屑带走,而来不及传入工件和刀具,所以刀具和工件的温度升高较小。

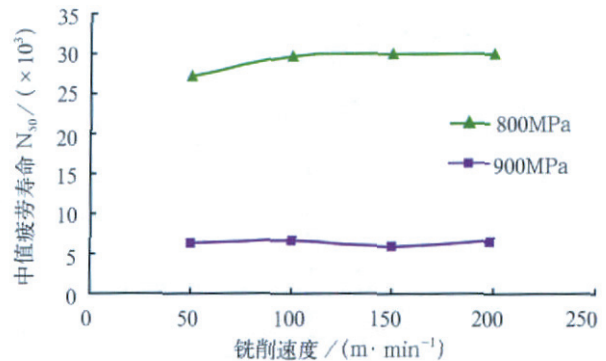


图5 不同速度和应力水平下疲劳寿命的对比

高速铣削钛合金时的刀具磨损,是扩散磨损、粘结磨损和热冲击相互作用、相互促进的结果。在200m/min的速度下,刀具寿命超过120min。

高速铣削钛合金可以得到较低的表面粗糙度数值,金相组织变化和加工硬化均不明显。对表层残余应力的X射线衍射分析表明,残余应力均为压应力,其值在-300~-30MPa之间。对试样的疲劳性能试验表明,在一定范围内提高切削速度有利于改善零件的表面完整性和疲劳性能。

本文有参考文献7篇,因篇幅所限未能一一列出,读者如有需要请向本刊编辑部索取。

(责编 良辰)