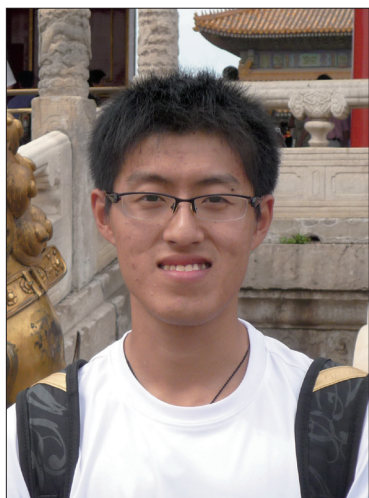


航空航天用钛合金的切削加工 现状及发展趋势

Status and Development Tendency of Machining on Titanium Alloy for Aviation and Aerospace Industry

沈阳理工大学机械工程学院 吕 杨
沈阳第一机床厂 李晓岩



吕 杨

沈阳理工大学机械制造及其自动化专业硕士研究生,主要从事高速切削技术的研究。

钛合金在航空航天工业和其他工业部门有着广泛的应用前景。随着科学技术的不断进步和我国国民经济的快速发展,作为“崛起的第三代金属”钛工业必将大有作为。

航空航天用钛合金的特点及应用

作为航空航天领域不断兴起的

在基于国内的材料、机床和管理等条件基础上,进一步加强钛合金材料加工工艺路线的优化、加工参数的优选,提高加工效率和产品质量,是推动国内钛合金产业和航空航天工业发展的重要因素。

材料,钛合金有以下优势^[1-3]:

(1) 比强度高。钛合金具有很高的强度,其抗拉强度为686~1176MPa,而密度仅为钢的60%左右,所以比强度很高。

(2) 高温性能优良。钛合金在高温下仍能保持良好的机械性能,其耐热性远高于铝合金,且工作温度范围较宽。

(3) 抗腐蚀性强。在550℃以下的空气中,钛表面会迅速形成薄而致密的氧化钛膜,其耐蚀性优于大多数不锈钢。

在航空工业领域,钛合金主要用于制造喷气发动机的压气机盘、涡轮盘、叶片、机匣等,以及诸如大型主起落架支撑梁、机身后段及转向梁等构件^[4]。因钛合金具有比强度高和耐高温特点,用于制造飞机发动机和机

体能够有效地提高发动机推重比和机体机构效率,有利于缓解热障现象^[5]。近年来军用飞机上所用钛合金材料的比例正在不断增加^[6],钛合金材料的应用水平已成为衡量飞机先进性的重要标志之一。美国第四代战斗机的F-22的机体主要承力材料大量采用钛64(Ti-6Al-4V),约占机身总质量的36%,钛62222主要用于发动机周围蒙皮机构及发动机框架,约占机身总质量的3%^[7]。在民用飞机方面,钛合金的应用也较为广泛。在波音777上大约采用了11%的钛结构,其平面钛箔的用量将达到12247kg^[8]。在航天工业领域,钛合金主要用于制造耐高温和低温零件^[9]。如上海钢铁研究所的7715D用于DFH-3卫星的FY-25型远地点发动机喷注器;俄罗斯的BT37合金广泛

应用于宇航工业形状复杂的低温管路系统。

航空航天用钛合金的切削加工现状

航空航天用钛合金零部件主要有两类。一类是复杂曲面,如叶轮、涡轮盘和叶片等,实际生产中采用多轴数控加工。图1中采用多轴铣削加工的钛合金涡轮即为复杂曲面。另一类是薄壁框型件,如大型框、梁和壁板等多采用铣削加工。图2中采用立铣加工的钛合金壁板是典型的薄壁框型件。上述两种工件的加工都必须从整块坯料中去除大量的材料,而钛合金的切削加工性较差,其工件的加工成本占工件总成本的比重很大。切削加工困难是导致钛合金零件价格高昂的重要因素。

1 钛合金的切削加工性

钛合金是典型的难加工材料,其加工特性表现如下^[10-11]:

(1) 钛合金的导热性差,是不良导热体金属材料。切削加工时,切屑与前刀面的接触面积很小,特别容易引起薄壁件的热变形。

(2) 钛合金弹性模量低,弹性变形大。切削时接近后刀面处工件的回弹量大,导致已加工表面与后刀面的接触面积特别大,造成加工件几何形状和精度差、表面粗糙度增大、刀

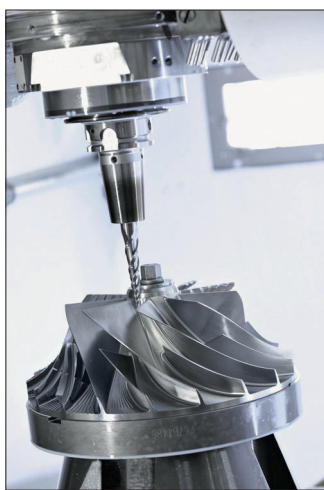


图1 多轴加工钛合金涡轮

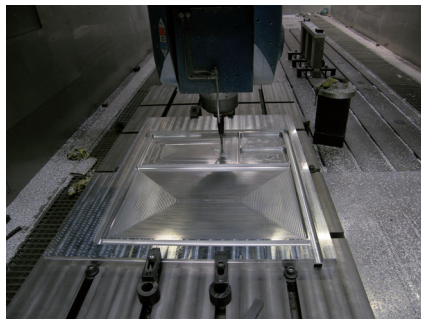


图2 立铣钛合金壁板

具磨损增加。

(3) 钛合金的亲性和大、切削温度高。切削时,钛屑及被切表层与刀具材料咬合,产生严重的粘刀现象,容易引起刀具强烈的粘结磨损。钛合金的高温化学活性强,在600℃以上时,与氧、氮产生间隙固溶。吸收气体后钛合金表面的硬度明显上升,对刀具具有强烈的磨损作用。

目前,我国的钛合金切削加工效率还比较低,生产中应用最多的硬质合金刀具推荐的切削速度在30~50m/min,与国外相比还存在很大差距。

2 目前的钛合金切削加工工艺

现有的钛合金切削加工方式主要是车削和铣削。钛合金车削加工时易获得较好的表面粗糙度,加工硬化不严重,但切削温度高,刀具磨损快。钛合金的铣削加工比车削加工困难。因为铣削是断续切削,并且切屑易与刀刃发生粘结,当粘屑的刀齿再次切入工件时,粘屑被碰撞并带走一小块刀具材料,形成崩刃,极大地降低了刀具的耐用度。

在加工钛合金时,通常选择较小的前角,以增大切屑与前刀面的长度;选择较大的后角,以减小后刀面与加工表面之间的摩擦。为了降低切削温度,通常选用较小的切削速度和较大的切深,并使用切削液。切削速度过小导致材料去除率低下,增加了钛合金加工成本;较大的切深导致切削力增大,影响钛合金工件尤其是薄壁件的质量;切削液的使用增

加了加工成本,造成环境污染,不符合绿色切削的要求。

目前,我国的钛合金加工缺乏有效的工艺数据库支持。在具体工艺安排和切削用量选择上,往往凭经验和“试切”来确定工艺参数。此外,我国刀具和切削液的国产化程度还比较低,制约了钛合金切削加工水平的提高。

钛合金切削加工的发展趋势

随着航空工业的发展,钛合金将逐步取代铝合金,成为航空工业的主要材料。未来的钛合金切削加工将主要面向3个方向:(1)大幅提高单位时间内的材料去除量,实现高效加工;(2)研发新型刀具,延长刀具使用寿命;(3)减少切削液的使用,达到绿色切削。

1 钛合金高速切削

高速切削能大幅提高钛合金加工效率,并保证零件加工质量。钛合金的高速槽铣和周铣实践证明,高速切削不仅能提高加工效率,还能有效提高被加工表面的质量^[12-14]。

钛合金高速切削具有以下优势:

(1) 温升少,工件热变形小。高速切削虽然产热量多,但由于切屑从工件上切离的速度快,90%以上的切削热被切屑带走,传给工件的热量很小,工件积累热量极少,这对于减少钛合金热变形有重要意义。

(2) 切削力低。切削速度高使得剪切变形区变窄,剪切角增大,变形系数减小和切屑流出速度快,从而使切削变形减小,切削力比常规切削力低30%~90%,特别适合于加工刚性差的航空用钛合金薄壁件。

(3) 材料切除率高,加工表面质量好。高速切削时其进给速度可随切削速度的提高相应提高5~10倍,这样单位时间内材料的切除量可提高3~5倍。另外随着切削速度的提高,切屑可以被很快切离工件,故残留在工件表面上的应力很小。由于

切削点温度的升高工件表面鳞刺的高度会显著降低甚至完全消失。

钛合金高速切削也面临着很多技术难题。高速导致加工表面温度急剧升高,由于钛合金导热性差,如不采取有效的降温措施,会使得钛合金和空气中元素发生化学反应,形成硬化层。高温烧蚀和切削力的增大造成刀具急剧磨损,使得加工不能持续。

2 钛合金切削加工的高性能刀具

大量的研究结果^[15-17]表明:刀具的快速磨损是制约钛合金高速切削加工的最主要因素。因而,要想提高钛合金加工和应用水平,必须研发适用于钛合金的高性能刀具。

刀具材料方面,应具备高的耐热性、抗热冲击性、良好的高温力学性能和高的可靠性。

硬质合金刀具的价格相对低廉,是目前使用最多的钛合金切削刀具,常用刀具有YG6、YG8等。但是在以往的研究和生产实践中,通常不采用YT类刀具,因为含钛的刀具材料在高温下很容易与钛合金亲合,使得粘结磨损严重。但是对刀具磨损的研究表明,钛合金在低速铣削时的刀具磨损机理为粘结撕裂磨损,在高速铣削时以扩散磨损为主^[18]。而含钛类刀具可有效抑制扩散磨损。因此,低速段使用的YG类硬质合金刀具不适合钛合金高速切削,而YT类刀具将是新的研究方向。

PCD刀具的性能很适宜于加工钛合金^[19]:(1)良好的导热性。金刚石的导热系数为硬质合金的1.5~9倍。由于导热系数及热扩散率高,切削热容易从刀具散出,故切削区温度低,这对于克服钛合金导热性差的问题有重要意义。(2)较低的热膨胀系数。金刚石的热膨胀系数比硬质合金小几倍约为高速钢的1/10,在高温下,能够更好地保证钛合金工件的加工质量。(3)极高的硬度和耐磨性。金刚石刀具在加工高硬度材料时耐用度为硬质合金刀具10~100倍甚

至高达几百倍。使用金刚石刀具切削钛合金,能够有效延长刀具使用寿命。Mori等^[20]采用新型PCD刀具在高速切削钛合金时获得了较好的切削效果。但是Balkrishna Rao等^[21]的研究结果表明,金刚石刀具的磨损形式表现为剥落和沟槽磨损,不能实现高速切削。

在刀具结构方面,Komanduri与Reed^[22]设计了一种可提高刀具寿命的新型刀夹,该刀夹可获得较大的刀具后角和负前角;Shuting Le等^[23]研究了可转位刀具在高速车削Ti6Al4V钛合金过程中的应用状况,在高速切削状态下,可转位刀具的寿命比固定位刀具的寿命增长了37倍。

3 钛合金绿色切削

传统的钛合金切削使用大量的冷却液,增加了制造成本,造成了环境污染,还会损害工人的身体健康^[24]。绿色切削可有效解决由切削液引起的各类问题。目前国内外对绿色加工的研究主要有绿色切削技术和绿色冷却技术。

绿色切削技术包括:干式切削、准干式切削、低温切削和绿色湿式切削^[25-26]。

干式切削可完全消除使用切削液导致的一系列负面影响^[25],由于摩擦使工件和刀具的温度升高,导致刀具磨损加快,工件产生残留应力,同时会使得刀具和工件发生热变形,表面质量降低,因而不适用于航空航天用钛合金的加工。准干式切削又称MQL(Minimal Quantity Lubrication)极微量润滑技术,它是将极微量的切削油与具有一定压力的压缩空气混合并雾化后,喷射到加工区,对刀具和工件之间的加工部位进行有效的润滑。MQL可以大大减少“刀具-工件”和“刀具-切屑”之间的摩擦,起到抑制温升、降低刀具磨损、防止粘连和提高工件加工质量的作用。使用的润滑液很少,而效果却十分显著,既提高了工效,又不会对环境造

成污染,是钛合金切削加工的有效途径。低温切削能够提高工件的切削加工性、刀具寿命和工件表面质量,非常适用于钛合金加工。林肯大学的Z.Y.Wang^[27]的研究结果表明,在超低温加工状态下,刀具材料能够保持良好的切削性能,提高了刀具寿命,保证了切削效率和加工质量。

绿色冷却技术是实现绿色加工的关键,主要包括:液氮冷却、蒸汽冷却、低温气体射流冷却以及喷雾射流冷却等。

液氮冷却采用液氮使工件、刀具或切削区处于低温冷却状态进行切削加工,是目前主要的低温加工手段。低温气体射流冷却是采用-10~-100℃的冷风强烈冲刷加工区的一种冷却方式。试验证明,该方式可以显著均匀地降低加工区、刀具及工件的温度,有效地抑制刀具磨损,提高刀具耐用度,改善已加工表面的加工质量和提高零件加工精度^[28-29]。由于液氮冷却切屑收集困难,纯气体冷却时刀具没有得到润滑等问题,制约了此种冷却方式的推广。有学者在此种方法基础上提出了钛合金低温喷雾射流冷却加工^[30]。低温喷雾射流冷却加工兼备了低温、射流冲击、充分汽化和使用最绿色的空气等几个要素。

结束语

为了满足航空航天对于钛合金工件日益增长的需求,我国的钛合金切削加工必须有长足的进步。在基于国内的材料、机床和管理等条件基础上,进一步加强钛合金材料加工工艺路线的优化、加工参数的优选,提高加工效率和产品质量,是推动国内钛合金产业和航空航天工业的发展的重要因素。

本文共有参考文献30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 三丰)