

航空发动机模具的高速铣削

Research on High Speed Milling of Mould and Die of Aeroengine

南昌航空大学航空制造工程学院 王细洋



王细洋

南昌航空大学航空制造工程学院教授,工学博士。研究方向为高速切削及过程监控。

叶片是航空发动机的主要零件,其特点表现为形状和载荷情况十分复杂,且尺寸大小相差悬殊。一般来说,叶片的加工工作量占整套发动机加工工作量的30%~40%^[1]。叶片的主要制造工艺过程分为毛坯制造和机械加工两大阶段。叶片毛坯的制造一般有铸造和锻造2种。铸造工艺多用于涡轮工作叶片和导向器叶片,特别是空心叶片,目前已由普通铸造发展为熔模精密铸造。锻造叶片最大的优势就是叶片强度高,但锻造模具的加工难度大,费用高。叶片锻造工艺也已由半精锻逐步发展为精锻。无余量精密锻造叶片成为今

高速切削具有高效、高精度、能切削高硬材料、工件表面质量高等一系列优点,是解决航空发动机叶片模具制造的有效手段。迄今,高速切削技术在航空制造业、汽车制造业、模具工业中应用最为广泛并最为成功。在航空制造业的应用,主要集中在飞机整体结构件和航空发动机高硬合金零件(主要为叶片)的高速切削上,而有关航空发动机压气机叶片和涡轮叶片模具的高速铣削技术和工艺,关注者不多。

后压气机叶片制造的发展趋势。

由此可见,叶片精密铸模和精密锻模是叶片制造的重要工装。精铸模和精锻模的型腔曲面与叶片曲面配对,形状复杂;种类多,批量小;材料的可加工性差,尤其是锻模。据统计,叶片模具的设计和制造周期占整个航空发动机设计制造周期的30%^[2],对发动机的制造质量、生产周期、制造成本有直接影响。

高速切削具有高效、高精度、能切削高硬材料、工件表面质量高等一系列优点。虽然在机床、刀具方面的一次性投资较高,但综合考虑叶片模具的生产效率、成品率、使用寿命以及磨损后的可修复性,高速铣削仍是解决航空发动机叶片模具高效、低成本制造问题的最有效方法。

迄今,高速切削技术在航空制造业、汽车制造业、模具工业中应用最

为广泛并最为成功。在航空制造业的应用,主要集中在飞机整体结构件和航空发动机高硬合金零件(主要为叶片)的高速切削上,而有关航空发动机压气机叶片和涡轮叶片模具的高速铣削技术和工艺,关注者不多。

叶片模具机械加工工艺分析

1 材料分析

叶片材料有铝合金、钛合金和不锈钢,其精铸模具或锻造模具的型体和型芯,材料一般为合金钢并经过淬硬处理(即淬硬钢),如5CrNiMo。淬硬钢一般指经过淬火并回火后硬度达到HRC 50以上的钢^[3]。淬硬钢材料的硬度高,耐磨性好,塑性差;导热性能差,导热系数约为45钢的1/7。淬硬钢材料的硬度和强度取决于组织中马氏体的含碳量。

叶片模具材料的这些因素给切

削加工带来以下困难:(1)单位切削力大,加工困难,且切削过程的平稳性较差;(2)材料导热系数小,切削温度高,使刀具磨损严重,而组织中回火后呈弥散分布的细小碳化物加剧了刀具的磨损;(3)工件硬度和切削速度是影响切屑形态的主要因素,在一定速度条件下,淬硬钢切削时易产生锯齿状切屑,造成切削力的循环变换和高频振动,工件表面质量差。

常规速度的铣削难以直接加工淬硬钢,过去常采用电火花加工和磨削加工,效率低。高速铣削可以加工硬度 HRC60,甚至更高的工件材料,可直接加工淬硬后的模具,因为^[4]:

(1)由于切削机理的不同,高速切削时切削力降低,加工容易,且切削变形小;

(2)高速切削时,切屑以很高的速度排出,带走大量的切削热,传给工件和刀具的热量大幅度减少;

(3)工作平稳,振动小,零件的加工表面质量高,原因有2个方面:高速切削时,机床的激振频率高,远离了工艺系统的固有频率,避免了颤振;切削力是切削过程中的主要激励源,切削力降低使得激励源减小。采用高速切削,不但可大幅度提高生产率,而且可有效地减少刀具磨损,提高零件加工的表面质量。

2 工艺分析

由于航空发动机叶身型面是由基元叶型按一定的积叠规律积叠而成的空间曲面^[1],形状复杂(见图1),因此其精密铸模和锻模的型腔曲面也是复杂的自由曲面^[5]。型腔曲面宜采用数控多轴铣削方法进行加工。

传统的叶片模具加工路线为:毛坯退火-粗铣-半精铣-淬火和回火-粗磨-电火花加工特殊部位(型腔、尖角)-精磨-钳修。在该工艺流程中,淬火后只能进行磨削加工和电火花加工,热处理产生的变形也必须由电火花或手工进行修复。手工加工时间要占整个加工周期的很

大部分,生产效率低。



图1 航空发动机涡轮叶片

若采用高速铣削方法,则其工艺流程为:毛坯退火-粗铣-半精铣-淬火和回火-高速铣削-钳修。

不同的加工方法和机床、不同的工件材料,对应的高速切削速度范围不一样,所以很难对高速切削的速度范围给定一个确定的数值。依据萨洛蒙高速切削假说以及高速切削机理的研究结果,在高速切削速度范围内,切削力下降,工件的温升较低,热变形较小,刀具的耐用度提高。一般,工件材料硬度越小,高速切削速度越高。对于淬硬模具钢,高速切削速度应为 300m/min 左右。

高速铣削淬硬模具钢时,达到一定的切削速度后,刀具与工件接触区域的温度将保持在 700℃左右,不再继续升高;工件的平均温度保持在 190℃~225℃之间^[3]。这可以采用很高的切削速度、较低的每齿进给量和切削深度直接高速铣削淬硬模具钢的重要依据。

高速铣削除了提高切削效率之外,还会带来如下优点:

(1)加工费用低。高速铣削取代电火花加工,可直接加工淬硬后的模具型腔。这样既省去了电极材料、电极加工编程和加工,又节省了电极加工过程所需费用。材料去除率可与电火花加工相媲美,甚至更优,可获得更好的表面质量。例如,某锻模材料硬度高达 HRC54,型腔精加工若全部由高速切削来完成,加工时间为 88 min。如果按照以前的工艺,从生产电极、电火花加工到抛光大约需 17h。

(2)模具寿命延长。高速切削避免了电火花加工在加工表面留下

白硬层(重铸层)的缺陷。白硬层对模具寿命,特别是在压铸和锻造等高应力状态下使用的模具是十分有害的。模具寿命的提高还有另外一个原因,在传统的加工工艺中,电火花加工去除的型腔余量较大。模具材料的淬透性较差,模具心部与外表面的硬度相差较大,当加工的余量较大时,模具心部硬度较低处就成了加工后的外表面,导致该处强度与硬度下降,使用寿命下降。

(3)减少了手工修整工作量。由于高速铣削切削量减小,可以使用更小直径的铣刀对小的圆角半径和模具结构的细节进行加工,节省了部分加工和手工钳修工作。手工修整时间的减少和生产工艺简化对缩短生产周期的贡献甚至超过了高速切削速度提高带来的价值。获得的表面粗糙度可以达到 $R_a0.5$,可以与磨削媲美。

(4)高速铣削也使得模具修复更加方便。叶片模具在使用一段时间后,在下模型线的分模面就会出现塌陷,导致产品质量下降,这时就需要修模,以保持产品的质量和延长模具的使用寿命。过去修模主要是通过把塌陷处补焊再电火花加工来完成,或补焊后手工打磨。补焊时,模具存在应力集中,易导致模具使用时开裂。因此,电火花加工后还须增加去应力退火,模具的修模时间较长。采用了高速加工后,只需降低模具的分型面,直接使用原来加工时的 NC 精加工程序,无需重新编程,提高了修模效率。并且可以提高模具型腔的表面粗糙度,去除模具使用的过程中产生的龟裂等缺陷,使模具使用寿命延长。

综上所述,在叶片模具的高效、低成本制造中,高速铣削能发挥重要作用。

刀具及刀具材料

为了使高速铣削在模具加工中发挥高效、低成本的优势,必须合理

选择刀具及刀具材料。

1 刀具材料

阻碍高速切削技术发展的一个重要障碍曾经是刀具材料的耐高温和耐磨损问题。刀具磨损机理研究表明,在高速切削时,刀尖温度将超过900℃,此时刀具的磨损不仅是机械摩擦磨损(以刀具后刀面磨损为主),还有粘接磨损、扩散磨损以及氧化磨损(以刀具刃口磨损和月牙洼磨损为主要形式)。高速切削刀具材料需要更高的硬度和耐热、耐磨性。新材料、新工艺的不断出现,使刀具材料由早期的高速钢、硬质合金发展到陶瓷、金刚石、CBN、PCBN (Polysrystalline cubic born nitride, 聚晶立方氮化硼)和刀具涂层材料。PCBN 刀具和硬质合金涂层刀具在叶片模具的高速铣削中应用最为广泛。

PCBN 是在高温高压下将微细的CBN材料烧结结合在一起的多晶材料。由于受CBN制造技术的限制,目前直接用于切削刀具的大颗粒的CBN仍很困难,因而PCBN得到了较快发展。由于PCBN刀具具有与金刚石刀具相近的硬度,又具有高于金刚石的热稳定性和对铁族元素的高化学稳定性,因而在淬硬模具钢的高速切削中应用广泛。

PCBN 刀具不宜在低速下进行切削,因为它是以负前角与高速切削时所产生的高热不断在切削区极微小范围内使工件材料软化进行切削加工的,而且也不宜切削软的铁族材料、未淬火钢和铝合金等,因为易产生积屑瘤,引起切削力波动,使被加工表面恶化,降低刀具寿命。

硬质合金刀具材料虽具有韧性好、抗冲击、通用性好等优点,但其高温硬度和耐磨性仍不能满足高速切削需要。刀具涂层技术是硬质合金刀具技术发展中的一个重要转折点。涂层硬质合金是用气相沉积方法,在韧性较好的硬质合金基体上,涂覆一层或多层高硬度、高耐磨性的材料,

从而获得既有高韧性又有高耐磨性的刀具材料。涂层材料可分为2大类:一类是“硬”涂层材料,如TiC、TiN、Al₂O₃等,优点是硬度高、耐磨性好。另一类是“软”涂层材料,如MoS₂、WS₂等,特点是表面摩擦因数低,切削力小,切削温度低。为了改善涂层刀具的切削性能,新型涂层材料及涂层方法层出不穷。

复合涂层与多层涂层材料,例如,TiAlN、TiCrAlN、TiSiN与TiAlSiN,在淬硬钢的高速切削中应用广泛^[6]。复合涂层是由各种不同功能或特性的涂层薄膜组成的结构,其典型涂层为目前的硬涂层+软涂层,每层薄膜各具不同的特征,从而使涂层具有更好的综合性能。多层涂层是由多种性能各异的薄膜叠加而成,每层膜化学组成基本恒定^[7]。其中,TiAlN涂层具有硬度高、氧化温度高、热硬性好、附着力强、摩擦因数小、导热率低等优良特性,尤其适用于高速切削高合金钢、不锈钢、钛合金、镍合金等高硬材料。在要求高耐磨性的场合下,鉴于TiN涂层在高温性能方面所表现出的不足,TiAlN有望部分或完全替代TiN^[8-9]。

实践证明,涂层硬质合金刀片比未涂层刀片的寿命提高几倍^[10]。此外,涂层刀片通用性好,一种刀片可以代替多种未涂层刀片,大大简化了刀具管理和降低了刀具成本。

2 刀具类型与结构

在叶片模具高速铣削过程中,整体式立铣刀应用最为广泛。叶片模具高速铣削铣刀有3大类:平底立铣刀、球头立铣刀和可转位铣刀。平底铣刀的刀尖很容易破损、刀具易失效、曲面加工精度低。由于模具型腔为自由曲面,且精度和表面质量要求高,因而球头立铣刀应用最多,且球头铣刀刀尖不像平底铣刀刀尖那样薄弱,并且刀刃形状有利于切削刃上载荷的均匀分布。但球头铣刀的制造比平底铣刀困难,球心处的切削速度为零,使得加工

表面质量降低。对于小尺寸的型腔,不宜采用可转位铣刀。

需要特别注意的是,在整体式硬质合金涂层立铣刀高速加工时,由于加工过程中往往是刀尖先接触工件,而铣刀刀尖处刚性差,易发生刀尖破损。刀具破损后刀尖附近的涂层易被破坏而可能出现脱落。工件淬火后硬度大大提高,若淬火后工件材质不均、有裂纹,可加工性能大大降低,当加工到淬火后的局部硬质点位置时,切削力会突然变大,容易出现崩刃现象。

刀具结构、切削刃的几何参数以及刀具的断屑方式等对高速切削的效率、表面质量、刀具寿命以及切削热量的产生等都有很大影响。

在高速铣削时,合适的刀具后角和合理的进给速度,能产生足够大的切屑厚度,带走热量,避免切削硬化。刀刃前角是影响刀具切削载荷的重要参数,应合理选择;切削载荷与刀具每切刃的进给量有关。

一般来说,高速刀具的几何角度和传统的刀具大都有对应的关系。选择合适的刀具参数,除了使刀具保持切削刃锋利和足够的强度外,很重要的目的是能形成足够厚度的切屑,使切屑成为切削过程的散热片,带走尽可能多的热量。

铣削用量与铣削方式

对于模具加工,正确选择和优化切削参数,是保证高速切削能够达到预期效果、避免机床颤振的重要环节。目前,高速加工还没有完整的工艺参数表和高速切削数据库,不能通过切削手册进行选择。对于每一种刀具也还没有特定的公式来确定最佳的切削参数组合。

高速铣削用量主要包括铣削速度、铣削深度(包括轴向铣削深度和侧面铣削深度)、进给速度或每齿进给量以及铣削刀具的悬伸长度等。影响高速铣削用量的因素非常多,其

中最主要的是工件材料和铣刀材料的匹配关系。

实际生产中,可以根据工件材料、刀具材料、工序特征等,通过实验或仿真的方法来确定最佳的切削速度和进给量。目前有相当多的研究者在关注高速切削用量的选择问题。

对于淬硬模具钢,高速铣削速度应在 300~6000m/min 范围内。通常采用的切削方案为:高切削速度、中进给量和小切削深度。但实际加工中,并不是切削速度越高,效果越好。要对工件、刀具以及设备综合考虑,制订合理的加工方案。需要指出的是,对于叶片模具小半径、狭窄的型腔或轮廓加工,为了达到高的轮廓精度,仍需要较大的进给速度,尤其是对于高硬淬硬钢材材料。若进给速度过低,铣刀可能会因热过载而失去切削能力。

高速铣削时,应尽量选用顺铣加工,因为在顺铣时,刀具刚切入工件产生的切屑厚度为最大,随后逐渐减小。在逆铣时,刀具刚切入工件产生的切屑厚度为最小,随后逐渐增厚,这样增加了刀具与工件的摩擦,在刀刃上产生大量热,所以在逆铣中产生的热量比在顺铣时多很多,径向力也大大增加。同时在顺铣中,刀刃主要受压应力,而在逆铣中刀刃受拉应力,受力状态较恶劣,降低了刀具的使用寿命。

铣削型腔曲面时,刀具可以是 Z 向垂直进/退刀,曲面法向的进/退刀,曲面正向与反向的进/退刀和斜向或螺旋式进/退刀等^[9]。在实际加工中,可以采用曲面的切向进刀或更好的螺旋式进刀。而螺旋式进刀切入材料时,如果加工区域是上大下小,螺旋半径会随之减小以进刀到指定深度。若叶片型腔带有敞口,此时应尽量从材料的外面走刀,以实时分析材料的切削状况。而对于没有型腔的封闭区域,采用螺旋进刀方式,在局部区域切入。

高速切削要保证刀路的方向性,当曲面曲率变化大时,应以最大曲率

半径方向作为最优走刀方向;曲面曲率变化小时,曲率半径对走刀方向的影响减弱,宜选择单条刀轨平均长度最长的走刀方向。

在保证加工精度的前提下,应减少空走刀时间,尽可能增加切削时间在整个工件中的比例,以提高加工效率。目前国内航空业的高速切削加工主要采用回路切削,即通过不中断切削过程和刀具路径,减少刀具的切入和切出次数,以获得稳定、高效、高精度的切削过程。可以采用环切、螺旋切削,或者分步环切法走刀。

锯齿状切屑是高速铣削淬硬钢材材料时常常产生的切屑类型。锯齿状切屑的产生会造成切削力的周期性循环变换和高频振动,影响刀具寿命,使刀具过早失效。对于锯齿状切屑的产生机理,目前存在绝热剪切和周期脆性断裂 2 种理论体系。文献[3]认为,当切削速度提高到一定临界值时,由于温度升高而导致的材料热软化作用大于形变强化作用,切屑形态由连续带状转变为剪切带均匀间隔分布的锯齿状切屑。

锯齿状切屑的变形程度在很大程度上决定了淬硬模具钢的加工难易程度。材料硬度越高,切屑形态由连续带状转变为锯齿状的切削速度越低。针对不同硬度的工件材料,通过优化切削速度、每齿进给量和切削深度等加工条件组合,可以控制切屑形态为连续带状。

结论

(1) 叶片精密铸模和精密锻模的制造是航空发动机叶片制造的重要工艺准备工作。高速铣削由于能直接加工淬硬材料,从而取代了传统工艺中的电火花加工和磨削加工,并减少了钳修工作,延长了模具寿命。

(2) PCBN 刀具和涂层硬质合金刀具材料在叶片模具高速铣削中应用较多,其中 TiAlN 涂层材料有其独特的优点,应用潜力大。整体式平底

立铣刀和球头铣刀,适合于叶片模具型面的加工。

(3) 高速铣削参数是影响工件加工精度和效率的重要因素,其选择目前仍依赖于经验。铣削方式建议采用顺铣。型腔曲面加工时,应慎重选择进刀/退刀方式文献[3]认为,当切削速度提高到一定临界值时,由于温度升高而导致的材料热软化作用大于形变强化作用,切屑形态由连续带状转变为剪切带均匀间隔分布的锯齿状切屑。

锯齿状切屑的变形程度在很大程度上决定了淬硬模具钢的加工难易程度。材料硬度越高,切屑形态由连续带状转变为锯齿状的切削速度越低。针对不同硬度的工件材料,通过优化切削速度、每齿进给量和切削深度等加工条件组合,可以控制切屑形态为连续带状。

参考文献

- [1] 《航空制造工程手册》总编委会主编. 航空制造工程手册—发动机叶片工艺. 北京: 航空工业出版社, 1998.
- [2] 刘彬, 莫蓉, 郭永辉等. 面向航空发动机模具的数据管理系统研究. 制造业自动化, 2006, 28(5): 24-26.
- [3] 秦哲. 淬硬模具钢高速铣削机理研究[D]. 广东工业大学博士学位论文, 2009.
- [4] 王细洋. 现代制造技术. 北京: 国防工业出版社, 2010: 8-9.
- [5] 吴斌. 高速切削在叶片模具制造中的应用. 模具技术, 2009, 1: 53-55.
- [6] 王豪. 复合涂层铣刀高速铣削淬硬钢的切削性能研究. 广西大学硕士学位论文, 2010.
- [7] 雒有成. 刀具涂层技术及其发展. 硬质合金, 24(4): 252-257.
- [8] 刘建华, 邓建新, 张庆余. TiAlN 涂层刀具的发展与应用. 工具技术, 2006, 40(14): 9-13.
- [9] 钟启茂, 刘浩, 魏莎莎. TiAlN 涂层刀具在淬硬模具材料加工中的应用. 机械工程师, 2007, 7: 61-63.
- [10] Kious M, Ouahabi A, Boudraa M, et al. Detection process approach of tool wear in high speed milling Measurement 2010, 43: 1439-1446.

(责编 三丰)