

航空复杂壳体零件深孔加工 技术研究*

张晓东^{1,2}, 韩 策¹

(1. 西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安 710072;

2. 西安航空动力控制科技有限公司, 西安 710077)

[摘要] 深孔加工在航空制造业中具有广泛需求,是加工难度最大的工序之一。复杂壳体零件是航空发动机的关键部件,其深孔加工质量直接影响航空发动机的服役性能和使用寿命。以航空复杂壳体零件为对象,针对航空复杂壳体零件深孔加工的工艺特点及难点,就目前现有深孔加工方法、深孔钻削力学、深孔钻削切屑形态与排屑方法、深孔加工在线监控及深孔加工设备等方面关键技术进行综述,并探讨了深孔加工未来的发展趋势。

关键词: 深孔加工; 钻削; 加工系统; 复杂壳体

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.15.050



张晓东

博士研究生、高级工程师,主要从事数字化制造、数控加工技术以及智能加工技术研究。

复杂壳体类零件是航空发动机系统中典型的结构件和关键件,是实现航空发动机燃油系统高、中、低压油路导引的核心部件。航空复杂壳体零件的显著特点是结构复杂、孔系众多,其内部有多达几百个纵横交错的各种深孔,孔径小、深径比大、直径从 1mm 到几十毫米不等、孔深与直径之比高达 50 以上,而且带有各种台阶孔、环形槽等结构。这些孔结构复杂、精度要求高、孔的圆度和直线度要求高、加工难度大,使深孔加工成为复杂壳体零件加工中难度最大的加工过程之一。复杂壳体零件的深孔孔系是燃油系统油路导引的通道,其加工尺寸误差直接影响发动机燃油系统工作性能,其表面质量直接决定发动机燃油系统的服役寿命,对航空发动机的质量和服役性能有着举足轻重的作用。随着新一代飞机和航空发动机的发展,复杂壳体类零件孔系结构的设计更趋复杂、精度要

求越来越高,对深孔加工技术提出了更高的要求。

然而,我国深孔加工领域的基础较薄弱,目前航空企业中尚缺乏高性价比的深孔加工专用装备,加之深孔加工技术的研究尚不成熟,导致目前我国航空企业中复杂壳体深孔加工普遍存在合格率低、生产效率低以及加工质量不稳定等问题。深孔加工技术成为航空发动机燃油控制系统研制生产的技术瓶颈,严重制约着我国航空制造业的发展,因此迫切需要对深孔加工技术展开深入研究。

本文以航空复杂壳体零件为对象,对深孔加工技术的工艺特点及难点、发展现状、关键技术等进行阐述,并展望了未来深孔加工的发展趋势。

深孔加工工艺特点及难点

在航空复杂壳体零件的深孔加工过程中,孔的超大深径比带来的钻杆低刚度问题、排屑和散热困难问题

*基金项目: 高档数控机床与基础制造装备国家科技重大专项(2015ZX04001203)。

以及加工时的封闭或半封闭状态等都使得深孔加工非常困难。航空复杂壳体零件深孔加工的难点主要体现在:

(1) 工艺系统刚性差。壳体零件中孔的小直径和超大深径比直接决定了钻削所用钻杆细且长,使得钻杆刚度不足,从而造成钻削过程中钻杆易产生偏斜、振动、扭曲,甚至折断。为避免这一问题,生产中往往采用小进给量钻削以避免大切削力带来的钻杆刚度问题,这严重制约了深孔的加工效率。然而即便如此,孔的加工质量仍很难保证。

(2) 排屑困难。孔的小直径和大深度决定了钻削过程中切屑在孔内的排屑空间小且排屑路径长,极易发生切屑堵塞,从而产生过大的扭矩,钻头随之发生崩刃、折断,造成零件报废。航空壳体零件多采用铝合金材料,加工过程中易发生粘刀现象,使排屑问题更为严峻。此外,采用外排屑方式时切屑会刮伤孔的已加工表面,造成孔壁出现螺旋沟,严重影响孔表面质量。

(3) 切削散热困难。一般孔的钻削过程中,80%的切削热被切屑带走。而在深孔加工中钻头在相对封闭的状态下工作,切削热很难扩散,由于壳体零件中很多孔直径很小,因此加工过程中的冷却、润滑也都很困难,这使得钻头和工件成为主要散热体,热量积聚效应非常明显,使钻头温度升高、磨损加剧,极大影响了钻头使用寿命。同时,当温度过高时,加工孔也会受到热效应影响而发生变形,影响孔的尺寸精度。

(4) 难以观察加工过程。由于壳体零件的孔隙结构复杂、深孔空间狭小,加工过程处于封闭或半封闭的状态,无法直接观察钻头的状态和孔的加工情况。

以上工艺特点及难点决定了深孔加工过程中的随机故障很多。大量的试验和研究表明,刀具磨损、破

损和切屑堵塞是导致在深孔加工过程中较频繁出现故障的主要原因^[1]。在航空复杂壳体零件的加工中,孔加工通常是中间工序或最后工序,一旦在孔加工过程中发生钻杆折断或孔道刮伤、偏斜等故障,将直接导致零件报废,造成巨大经济损失。

深孔加工技术发展现状

1 深孔加工发展历程

孔加工起源于美国人发明的扁钻,以及后来改进形成的麻花钻。这两种钻头的结构相对简单,切削液导入方便,便于制造出不同直径和长度的钻头以适用于加工不同尺寸的孔。然而,当加工深孔时,扁钻和麻花钻的排屑和冷却十分困难,同时由于钻杆刚度随之降低,也限制了加工效率。20世纪初,为解决枪管加工问题,美、英等国军事工业部门发明了枪钻。枪钻系统将高压切削液通过钻杆内部通道送到切削部分,进行冷却和排屑,属于外排屑的钻削方式。此外,枪钻钻头上安装有导向块,具有自导向功能。但由于采用外排屑方式,切屑与加工表面会发生刮擦,影响孔表面质量。同时,由于自身结构缺陷,导致枪钻的成本较高而加工效率和精度较低。第二次世界大战期间,为满足枪炮高效生产的需求,德国的 Beisner 于 1942 年发明了一种内排屑深孔钻,后经国际孔加工协会(Boring and Trepanning Association, BTA)的改进,形成了 BTA 钻削方法。BTA 系统采用的钻杆结构刚度较高,采用内排屑方式,孔表面质量较好。但是 BTA 系统具有切削液压力高、密封困难的缺点。1963 年,瑞典 Sandvik 公司利用液体的喷吸效应原理,发明了喷吸钻法,利用切削液的喷、吸联合作用,改善了排屑方法,降低了系统的压力。20 世纪 70 年代,日本冶金股份公司发明了双进油管喷吸钻系统(Double Feeder, DF),它将双管系统改为单管,增加了一

个专门起吸效应的油压头,增大了钻杆的刚度。20 世纪 80 年代,国内中北大学的王峻等发明了单管内排屑喷吸钻(Single-Tube Inner Chip Removal Ejector Drill, SIED),SIED 技术完善了 DF 钻的抽屑容器设计,使抽屑能力大大增强,同时对钻头结构进行了优化设计,构成了以单边刃、单管内排屑喷吸钻、自导向为特征的钻削系统,这项技术成为当前先进的深孔加工技术^[2]。

2 现有深孔加工系统及方法

除传统钻削外,目前常用的深孔加工系统有枪钻系统、BTA 系统、喷吸钻系统、DF 系统和 SIED 系统。现有深孔加工方法按排屑方式可分为外排屑和内排屑两种,外排屑是指切削液由钻杆内部进入,经钻头小孔喷射到切削区域,然后携带切屑从钻杆外部与孔壁的间隙排出的方法,主要包括扁钻、麻花钻和枪钻等;内排屑是指切削液从钻杆与孔壁的间隙进入,靠切削液的压力将切屑推入钻头小孔,经钻杆的内部通道排出的方法,主要包括 BTA 钻、喷吸钻、DF 钻和 SIED 钻等。外排屑的缺点是切屑会与孔壁接触产生划痕而破坏孔表面质量,此外钻杆刚度不足导致加工效率较低,加工精度难以保证;内排屑克服了这些缺点,但由于需要足够的容屑空间,导致钻杆的最小直径受到限制。生产实践中需要根据加工孔的尺寸和质量要求等实际情况合理选择加工方法。

2.1 传统钻削

传统深孔加工一般以使用麻花钻为代表。在航空复杂壳体零件深孔加工中典型的工艺方法是采用长、短麻花钻配合使用、钻削过程多次退刀排屑、逐级延伸钻孔的方法。传统钻削方法材料去除率大,便于在数控加工中心上与其他加工方法集成,加工效率高,而且具有加工操作简单、不需要专用设备、成本低等优势。因其钻头结构相对简单,钻杆可以制造

得很细,目前对于直径小于6mm的深孔,传统钻削仍是主要的加工方法。基于上述原因,传统钻削方法目前仍是我国航空企业复杂壳体零件深孔加工的最常用方法。但是,传统深孔加工的主要问题在于钻头易折断、排屑和冷却问题难以解决,因此将造成返工返修,甚至整套壳体零件的报废,导致生产周期延长、质量稳定性差等问题。目前,随着航空复杂壳体批量生产质量和加工效率要求的逐步提高,传统钻削方法面临越来越多的问题和挑战。

2.2 枪钻

枪钻因最早用于枪管制造而得名。它采用单切削刃并具有自导向功能的V型中空钻杆,属于外排屑方式。其工作原理如图1所示,切削液从入口经加压泵进入钻杆内部通道,流向钻头的切削部分进行冷却润滑,并将携带切屑通过钻杆和孔壁间的V型槽,最后从出口排出。枪钻相比于采用麻花钻的传统钻削方式,改善了排屑和冷却的方法,钻头具有自导向功能,能够加工更深、更小的孔。但由于它仍属于外排屑方式,切屑容易擦伤已加工孔壁,而且孔较深时切屑必须保持小而薄的形状,才能保证被冷却液冲出,加之枪钻系统的排屑方法对油压要求很高,要求使用专用机床,导致费用昂贵。此外,枪钻具有难以弥补的结构性缺陷:一是其钻杆是V形非对称空心轴,刚性差,钻孔过程中容易发生质心偏移,因此只能传递有限的扭矩,进给量受到限制,只适用于加工小直径孔,加工效率低;二是其钻头与钻杆不可分离,通用性差。目前,枪钻系统主要用于加工直径 $\phi < 20\text{mm}$ 的深孔。

2.3 BTA系统

针对枪钻系统存在的缺点,国际孔加工协会发明了一种内排屑深孔钻,BTA系统中钻头与钻杆为中空圆柱体,提高了刀具刚性和快速拆装问题。其工作原理如图2所示,切削

液经加压从入口进入授油器后通过钻杆与孔壁形成的密封环状空间,流向切削部分进行冷却润滑,并将切屑压入钻头上的出屑口,经钻杆内腔从出口排出。相比于枪钻,BTA系统采用内排屑方式,切屑不与工件孔壁摩擦,加工质量较好,而且其钻杆为圆管状,刚性较好,加工效率较高。但BTA系统对切削液压力要求高、密封困难,受钻杆内排屑限制,排屑空间小,经常发生堵屑。为解决这一问题,通常需要在钻头上加工断屑台或采用错齿结构,而结构的复杂化造成钻头制造难度大且价格高,使BTA刀具实际上成为价格昂贵而并不耐用的垄断性工具产品,这是BTA钻在我国航空企业难以普及推广的重要原因^[9]。目前,BTA系统主要适用于直径 $\phi > 12\text{mm}$ 的深孔加工。

2.4 喷吸钻系统

喷吸钻系统(见图3)是瑞典Sandvik公司利用流体力学的喷吸效

应原理发明的双管内排屑深孔钻削方法。进一步改善了排屑过程,降低了冷却系统的压力。其喷吸钻系统采用双层管刀杆,切削液经加压后从入口进入,其中2/3的切削液进入内、外钻杆间的环形空间,流向切削部分进行冷却和润滑,并将切屑推入钻杆内腔;其余1/3的切削液,从内钻杆上月牙状喷嘴高速喷入内钻杆,在内钻杆内腔形成一个低压区,对携带切屑的切削液产生抽吸作用,在喷、吸双重作用下,促使切屑快速从出口排出。喷吸钻系统的切削液压力低且稳定,排屑顺畅,降低了密封性要求。此外由于其采用双层管刀杆,刚度较高,可以采用大进给量加工。然而喷吸钻系统的钻具结构复杂,制造难度大,成本高。对于孔深较大的孔负压抽屑效果受限,加之其采用双层管刀杆结构,容屑空间小,限制了排屑能力。目前,喷吸钻系统主要适用于直径 $\phi > 18\text{mm}$ 的深孔加工。

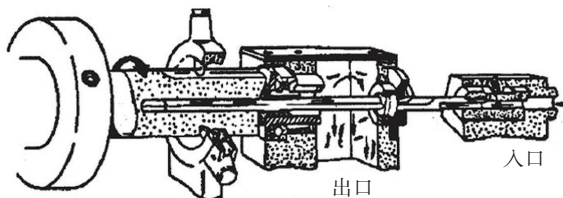


图1 枪钻系统工作原理
Fig.1 Structure of gun drill

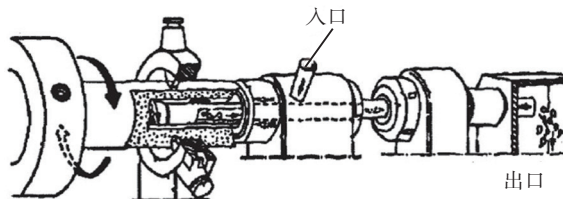


图2 BTA系统工作原理
Fig.2 Structure of BTA drill

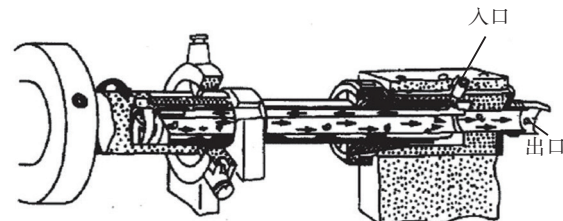


图3 喷吸钻系统工作原理
Fig.3 Structure of ejector drill

2.5 DF系统

DF系统(见图4)是日本冶金股份有限公司研制出的双进油单管内排屑系统,其切削液分为前后两支,分别从两个入口进入。前一支2/3的切削液经过钻杆与已加工孔壁形成的环状区域流向切削部分,并将切屑推入钻头上的出屑口进入钻杆,流向抽屑器;后一支1/3的切削液直接进入抽屑器,经前、后喷嘴之间喇叭口状的窄狭锥形间隙后获得加速,产生负压抽吸作用,达到加速排屑的目的。DF系统前半部分起“推”作用的结构类似于BTA系统,后半部分起“吸”作用的结构类似于喷吸钻系统,而由于DF系统采用了双进油装置,仅用一根钻杆即完成推压和抽吸的切屑方法,钻杆直径可以做得更小,相比于喷吸钻能够加工更小的孔,抽屑效果也优于喷吸钻。但其抽屑器设计仍不够完善,生产实践中DF系统仅可在有限范围内能替代BTA和双管喷吸钻。目前,DF系统的最小加工直径 ϕ 可达6mm。

2.6 SIED系统

SIED系统是一种由中北大学王峻^[4]发明的单管内排屑喷吸钻系统。该技术以BTA、喷吸钻、DF系统3种内排屑钻削技术为基础,增加了分调式功率增补型抽屑装置,可实现冷却和排屑液流的独立控制。其基本原理如图5所示,切削液由液压泵输出后,分为两个分支:前一支切削液流入输油器,经钻杆与孔壁之间的环状空间流向切削部分,将切屑推入钻头上的出屑口;后一支切削液流入抽屑器,经锥形喷嘴副之间的间隙进入后喷嘴内腔,产生高速射流和负压。SIED系统对两支液流各设独立的调压阀,可以分别调整至最佳冷却、抽屑状态。当钻孔长径比过大时,可适当加大后油路的压力,以保证不因油压降过大而降低抽屑功效。SIED系统的分调式功率增补型喷吸钻抽屑装置提高了系统对于不同尺寸深孔

排屑的适用性。SIED机床具有全面的兼容性,适用于包括内排屑深孔钻、深孔扩钻、套料钻、深孔铰刀、深孔镗头、电镀金刚石深孔刀具在内的各种内排屑深孔刀具。SIED系统是一种正在逐渐推广的系统,也是目前较先进的系统。目前,SIED系统可将最小钻孔直径缩小 $\phi 5\text{mm}$ 以下。

深孔加工关键技术

近年,针对深孔加工中存在的问题,国内外专家学者进行了大量的研究,主要涉及深孔加工的钻削力学、切屑形态及排屑方法、在线监控、加工系统及设备等方面。

1 钻削力学研究

钻削静力学是研究钻削过程力学特性的基础,过去几十年间得到了专家学者的广泛关注。Altintas^[5]以标准麻花钻为研究对象,推导了钻头切削刃微元的几何角度关系并利用直角切削到斜角切削的变换建立了麻花钻的钻削力和扭矩模型。白万民等^[6]以钻枪为研究对象,对深孔

钻削过程进行了受力分析,建立了枪钻的钻削力模型,并提出了试验和模型相结合的求解方法。李琦等^[7]以内排屑深孔钻为研究对象,通过试验方法建立了钻削力的经验公式,试验表明各段切削刃对切屑变形的影响趋势基本相同。除钻削静力学的研究外,钻削动力学也是近年来深孔加工领域的研究热点之一。朱林等^[8]通过钻削试验,根据钻削过程模型和试验数据分析了影响钻削稳定性的因素,在此基础上改进了深孔钻的结构设计,提高了钻削的稳定性。常豆豆^[9]以BTA系统为研究对象,分析了钻削过程中由于速度和位移反馈引起的切削颤振现象,建立了BTA钻横向、轴向、扭转方向的动力学模型及动态钻削力模型。Perng等^[10]根据Hamilton原理,考虑切削液和轴向压力的影响,分别推导了基于Timoshenko和Euler-Bernoulli梁模型的深孔钻杆运动方程,用旋转钻杆和非旋转钻杆两种不同方式添加随机激励,研究了钻杆的动态特

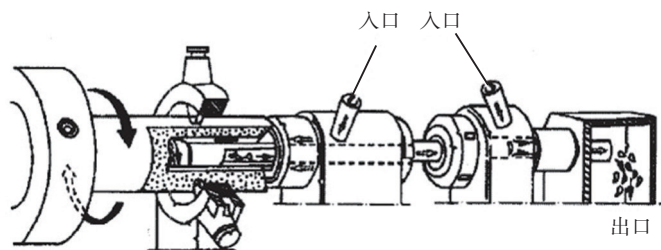


图4 DF系统工作原理

Fig.4 Structure of double feeder ejector drill

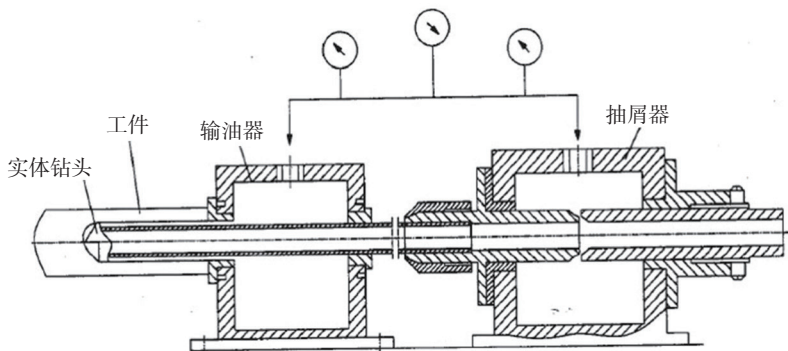


图5 SIED系统工作原理

Fig.5 Structure of SIED system

性。Ahmadi 等^[11]研究了钻杆不同方向的稳定性,建立了通用的钻削过程稳定性模型,并采用磨损刀具的钻削试验验证了模型的准确性。许多研究表明,深孔钻削过程中,钻杆系统存在明显的非线性特征,针对这一问题,Kovacic^[12]建立了深孔钻削钻杆系统的非线性动力学模型,并采用不同的刀具前角、剪切角以及进给量对钻削颤振机理进行了较全面的理论分析。因钻头的几何特点、钻削加工的封闭性以及钻削过程切屑和热效应影响,钻削相对于铣削、车削等切削过程更为复杂。目前针对钻削力学的研究中,大多以试验和数值模拟作为研究手段,得到的模型和结论主要依靠经验,缺乏对钻削机理的透彻理解,相关理论尚不完善。但这些研究对于了解钻削过程,改进钻削系统、钻削刀具、钻削工艺,以及优化钻削参数具有指导意义。

2 切屑形态及排屑方法研究

排屑过程是深孔加工与一般孔加工相比最显著的不同之处。在深孔加工中,由于排屑空间狭小,排屑过程变得困难且重要,直接影响加工的顺利进行,决定了孔加工的质量。因此,切屑形态以及排屑方法一直是深孔加工领域的难点与研究热点。赵如意等^[13]通过试验研究了3种不同刀片在BTA钻过程中,在不同切削参数下的切屑形态和切屑容屑系数对排屑的影响。试验表明,切屑容屑系数越小排屑越好,而且C形切屑的切屑容屑系数最小,对排屑最有利。汪志明^[14]对负压抽屑装置进行了研究,改善了深孔加工系统的排屑条件。马龙等^[15]通过SIED深孔钻削试验研究了不同主轴转速和进给下切屑的形态和容屑系数对排屑效果的影响。针对深孔加工中断屑和排屑的问题,隈部淳一郎在20世纪50年代提出了振动钻削理论,即在钻削过程中在某一个或几个特定方向对钻杆或工件施加某种有规律的

振动激励,钻头在振动中切削,使切削用量按某种规律变化,以控制切屑的大小和形状,达到避免发生切屑堵塞的目标。在国内,薛万夫等^[16]在1982年开发出振动钻削设备,并对深孔振动钻削中切削刃的相邻运动轨迹进行了理论分析,得出了保证断屑的加工条件。西安石油大学朱林,西安交通大学高本河等^[17]以及成都工具所的樊铁镔^[18]也在深孔加工的低频振动钻削开展了大量研究。目前,振动钻削已成为深孔加工的一个重要分支。排屑问题是深孔加工中最关键的问题之一,针对这一问题,近年来专家学者们从钻削刀具结构、抽屑装置、钻削参数以及钻削方法等方面进行了研究,发明了大量的新刀具、新装置和新工艺,排屑问题得到一定改善。未来,切屑形态和排屑过程的量化以及各种排屑结构、装置和方法的融合有待进一步研究。

3 在线监控研究

由于大深径比以及加工时的封闭或半封闭状态,无法直接观察到深孔加工过程中刀具的状态变化。因此,通过各种手段对深孔加工过程进行在线监测与控制成为深孔加工的另一个重要研究方向。在线监控的研究主要以切削力、机床功率、声发射、振动加速度等信号作为测量参量,在线监控钻头磨损及失效、振动、切屑堵塞、轴线偏移等现象,研究问题包括深孔加工在线监测的信号处理、信号特征提取和加工状态识别与反馈控制。常见的深孔加工在线监测方案如图6所示。Kavaratzis 等^[19]

将深孔钻削过程分为4个阶段,以切削力和扭矩为监测信号,采用多层次的控制方法,针对钻削过程的不同阶段采用不同的控制策略。在国内,哈尔滨工业大学、北京理工大学、西安理工大学、上海交通大学等院校和一些科研机构都对此进行了深入研究。其中,哈尔滨工业大学的王清明等^[20]提出利用多个特征参数综合监测钻削过程,通过大量试验,观察刀具在破损、折断等异常情况下,各个特征参数的变化规律,并设定阈值,对钻削加工过程进行监测。北京理工大学的王忠民等^[21]利用模糊模式识别技术处理经过离散二阶小波变换分解的切削过程声发射信号样本,实现对刀具磨损状态的在线识别。西安理工大学的李鹏阳等^[22]以钻削轴向力和扭矩为监测信号,通过对信号进行幅域和频域分析,提取了特征信号随钻头磨损量的变化规律。上海交通大学的孙程成等^[23]分析了枪钻扩散磨损和粘结磨损的形成机理,并以切削力、扭矩和声发射为监测信号对钻头状态进行监测,采用声发射信号对刀具磨损状态进行了表征。现有文献及相关报道中,在在线监测方面针对信号处理、特征提取和状态识别3个领域均有大量研究,以上研究为在线监控系统及设备的研发提供了理论依据,但多数为针对各领域相关算法及策略的独立研究,缺乏对完整在线监控闭环系统的整体研究。此外,针对深孔加工中易出现的故障,文献中对刀具状态的研究较多,而针对钻削过程的其他现象诸如切屑堵

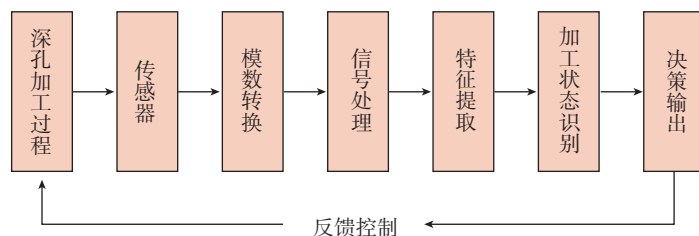


图6 深孔加工在线监控方案

Fig.6 Scheme of monitoring for deep holedrilling

加工难以达到要求。特种加工技术是借助电能、热能、化学能、声能、光能等多种能量或将几种能量进行复合以实现材料切除的加工方法。自1943年前苏联科学家拉扎林柯发明电火花加工方法后,利用机械方法以外的非传统加工方式得到了大量的研究,形成了特种加工这一新的发展领域,可以实现超硬、超软、超精、超光和超微等加工^[28]。目前,对于微小孔的加工,特种加工是主要的加工方法。一些学者已经开展了针对深孔的特种加工方法的研究,主要有:电火花加工、电化学加工、超声加工、激光加工、电子束加工、离子束加工、液体喷射加工等。未来,随着深孔加工的要求越来越高,机械加工方法将难以满足,深孔的特种加工方法将成为学术界的关注点之一。

3 绿色加工

近年来,随着环境保护的迫切程度越来越高,对制造业绿色化提出了更高的要求。传统深孔加工由于需要冷却和排屑,会产生大量的切削液,造成环境污染和资源浪费。为节省资源和减少污染物排放,绿色加工成为未来深孔加工发展的必然趋势。目前新型绿色加工技术主要有:绿色切削液、微量润滑、压缩空气冷却和干式加工。干式加工即在加工过程中不使用切削液,这从根本上避免了切削液的处理以及排放造成的污染,同时也降低了加工成本。但目前的深孔加工技术水平尚难以处理干式加工中产生的大量切削热,因此暂时无法推广应用。相对来讲,使用微量切削液可较大程度减少污染,同时技术难度大大小于干式切削,目前在学术界受到更多的关注。此外,已有学者研究具有生态性能的冷却剂,这既降低了散热的技术难度,又可实现绿色加工,并且其对人体健康无影响,也是一种有潜力的发展方向^[29]。未来,深孔加工的绿色化将成为工业界不可忽视的研究内容。

结论

深孔加工技术是一项多学科交叉的综合应用技术,目前在理论和应用方面都还不够成熟。由于深孔加工的困难,迫切需要对其理论和技术进行更加深入的研究。本文结合航空复杂壳体零件的深孔加工,介绍了深孔加工的概念,分析深孔加工的工艺特点及难点,阐述深孔加工发展的历程和目前的发展现状。通过对文献资料的调研,给出深孔加工的关键技术,并结合目前机械工业的发展现状展望了深孔加工未来的发展趋势。随着数字化技术、传感技术、信息技术等的快速发展和不断融合,深孔加工技术将会朝着智能化、多样化、环境友好的方向不断发展,在我国航空制造业中发挥更大的作用。

参考文献

- [1] 刘夏伟. BTA深孔钻削刀具磨损与排屑状态监测技术研究[D]. 西安:西安理工大学, 2013.
- [2] LIU Xiawei. Research on condition monitoring technology of drill wear and the state of chip removal for BTA deep-hole drilling[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2013.
- [3] 何定健,李建勋,王勇. 深孔加工关键技术及发展[J]. 航空制造技术, 2008(21): 90-93.
- [4] HE Dingjian, LI Jianxun, WANG Yong. Key technology and development of deep hole machining[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(21): 90-93.
- [5] 李阳. 高效深孔加工技术的研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2012.
- [6] LI Yang. The research of high efficiency deep hole processing technology[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2012.
- [7] 王峻. 现代深孔加工技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2005.
- [8] WANG Jun. Modern deep hole machining technology[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2005.
- [9] ALTINTAS Y. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and cnc design[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [10] 白万民,贾培刚,白震平. 深孔

钻削时的力学特性分析[J]. 新技术新工艺, 2000(6): 19-21.

BAI Wanmin, JIA Peigang, BAI Zhenping. Mechanical analysis on drilling deep-hole[J]. New Technology & New Process, 2000(6): 19-21.

[7] 李琦,于勇波,裴宏伟,等. 内排屑深孔钻削切屑变形与切削力试验研究[J]. 煤矿机械, 2004(4): 27-29.

LI Qi, YU Yongbo, PEI Hongwei, et al. The investigation on chip deformation and cutting forces of BTA deep hole drilling[J]. Coal Mine Machinery, 2004(4): 27-29.

[8] 朱林,王世清,刘战锋,等. 深孔钻削稳定性研究及应用[J]. 机械工程学报, 1998, 34(3): 101-106.

ZHU Lin, WANG Shiqing, LIU Zhanfeng, et al. Study on deep hole drilling's stability and its application[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1998, 34(3): 101-106.

[9] 常豆豆. BTA深孔钻削加工系统颤振稳定性研究[D]. 太原:中北大学, 2015.

CHANG Doudou. Research on chatter stability of BTA deep hole drilling processing system[D]. Taiyuan: North University of China, 2015.

[10] PERNG Y L, CHIN J H. Theoretical and experimental investigations on the spinning BTA deep-hole drill shafts containing fluids and subject to axial forces[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1999, 41(11): 1301-1322.

[11] AHMADI K, ALTINTAS Y. Stability of lateral, torsional and axial vibrations in drilling[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2013, 68(3): 63-74.

[12] KOVACIC I. The chatter vibrations in metal cutting-theoretical approach[J]. The Scientific Journal FACTA Universities, Mechanical Engineering Series, 1998, 5(1): 581-593.

[13] 赵如意,关世玺. 深孔钻削切屑形态的研究[J]. 新技术新工艺, 2010(2): 42-43.

ZHAO Ruyi, GUAN Shixi. Study on the chip morphology of deep-hole processing[J]. New Technology & New Process, 2010(2): 42-43.

[14] 汪志明. DF深孔钻削系统排屑通道流量、负压通道流量及分流比的确定[J]. 中北大学学报(自然科学版), 1987(4): 10-17.

WANG Zhiming. The Determination of flow in chip-removing duct, flow in negative pressure duct and separating flow ratio of DF deep hole drilling system[J]. Journal of North Central University (Natural Science Edition), 1987(4): 10-17.

[15] 马龙,沈兴全,任晓敏. 高速小直

径深孔钻削过程中的切屑形态分析[J]. 制造技术与机床, 2014(2): 122-125.

MA Long, SHEN Xingquan, REN Xiaomin. Analysis on chip morphology in the high-speed small-diameter deep-hole drilling process[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2014(2): 122-125.

[16] 薛万夫, 孙苗琴. 振动切削深孔加工技术(上)[J]. 现代制造工程, 1992(10): 38-39.

XUE Wanfu, SUN Miaoqin. Vibratory deep hole machining technology(A)[J]. Modern Manufacturing Engineering, 1992(10): 38-39.

[17] 高本河, 熊镇芹. 深孔振动钻削的断屑条件研究[J]. 机械设计与研究, 1999(3): 63-64.

GAO Benhe, XIONG Zhenqin. Research on chip breakage condition of deep hole vibratory drilling[J]. Machine Design & Research, 1999(3): 63-64.

[18] 樊铁镔. DF 系统振动深孔钻的设计与应用[J]. 工具技术, 1998, 32(3): 19-25.

FAN Tiebin. Design and application of DF system vibrating deep-hole drill[J]. Tool Engineering, 1998, 32(3): 19-25.

[19] KAVARATZIS Y, MAIDEN J D. System for real time process monitoring and adaptive control during cnc deep hole drilling[J]. International Journal of Production Research, 1990, 28(12): 2201-2218.

[20] 王清明, 董申, 李小隍. 基于小波分析的钻头破损检测[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2000, 32(6): 76-79.

WANG Qingming, DONG Shen, LI Xiaoli.

Detection of drilling tool breakage using wavelet analysis[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2000, 32(6): 76-79.

[21] 王忠民, 王信义, 陈爱第, 等. 基于小波分析的刀具磨损状态监测方法[J]. 北京理工大学学报, 2001(1): 101-107.

WANG Zhongmin, WANG Xinyi, CHEN Aidi, et al. Monitoring tool wear states in turning based on wavelet analysis[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2001(1): 101-107.

[22] 李鹏阳, 杨明顺, 袁启龙, 等. 基于切削力信号的钻头磨损状态实时监测[J]. 工具技术, 2005, 39(8): 79-82.

LI Pengyang, YANG Mingshun, YUAN Qilong, et al. Drill wear on-line monitoring by using cutting force signal[J]. Tool Engineering, 2005, 39(8): 79-82.

[23] 孙程成, 胡蒙, 郭国强, 等. 枪钻的刀具磨损及监测技术[J]. 工具技术, 2016, 50(11): 3-6.

SUN Chengcheng, HU Meng, GUO Guoqiang, et al. Review of tool wear and tool condition monitoring in gun-drilling with small diameters[J]. Tool Engineering, 2016, 50(11): 3-6.

[24] RAABE N, WEBBER O, THEIS W, et al. Spiralling in BTA deep-hole drilling: models of varying frequencies[M]// From Data and Information Analysis to Knowledge Engineering. Springer: Springer Berlin Heidelberg, 2005: 510-517.

[25] 蒋超猛, 张弓, 王映品, 等. 深孔加工技术的研究综述及发展趋势[J]. 机床与液压, 2015, 43(11): 173-177.

JIANG Chaomeng, ZHANG Gong, WANG Yingpin, et al. Research review and development trend of deep-hole machining technology[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(11): 173-177.

[26] 关世玺, 范国勇, 常兴. 深孔加工关键技术研究[J]. 新技术新工艺, 2007(8): 29-31.

GUAN Shixi, FAN Guoyong, CHANG Xing. Study on key technology of deep-hole machining[J]. New Technology & New Process, 2007(8): 29-31.

[27] 张勇, 倪俊芳, 程坤. 深孔加工机床控制系统研制[J]. 电工电气, 2009(3): 59-61.

ZHANG Yong, NI Junfang, CHENG Kun. Machine tool control system manufacturing for deep-hole machining[J]. Electrotechnics Electric, 2009(3): 59-61.

[28] 启迪. 特种加工的分类、特点及趋势[J]. 机械工程师, 2008(11): 10-13.

QI Di. Classification, characteristics, trends of non-traditional machining[J]. Mechanical Engineer, 2008(11): 10-13.

[29] 熊艳伦, 汤佳骏, 刘炜. 深孔加工技术研究综述[J]. 现代农业装备, 2016(3): 24-28.

XIONG Yanlun, TANG Jiajun, LIU Wei. Summary of the research on deep hole processing technology[J]. Modern Agricultural Equipments, 2016(3): 24-28.

通讯作者: 张晓东, E-mail: avail_2006@126.com。

Research Review of Deep Hole Machining Technology for Complex Shell Part

ZHANG Xiaodong^{1,2}, HAN Ce¹

(1. Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. AVIC Xi'an Aviation Power Control Technology Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

[ABSTRACT] Deep hole machining is widespread in aerospace manufacturing industry and it is one of the most difficult processes. Complex shell parts are the key parts of an aeroengine. The quality of the deep holes in shell parts has an immediate impact on the service performance and life of an aeroengine. According to the technological characteristics and difficulties of the deep hole machining for complex shell part, the existing method and key technologies of deep hole machining including mechanical behavior, chip morphology and evacuation method, monitoring and equipment for deep hole machining are summarized. At last, the research development of this field in the future is discussed.

Keywords: Deep hole machining; Drilling; Machining system; Complex shell

(责编 铃兰)