

# 深孔加工关键技术及发展

## Key Technology and Development of Deep Hole Machining

四川大学制造科学与工程学院 何定健 李建勋 王 勇

**[摘要]** 深孔加工技术是一项仍在发展的综合技术。综述了深孔加工的难点及发展概况,分析了其关键技术。着重分析热量散放、排屑处理、工具导向、加工系统与加工工艺。探讨了该领域的研究动态。

**关键词:** 深孔加工 加工系统 加工工艺 传统加工

**[ABSTRACT]** Deep hole machining technology is a comprehensive technique that is developing skill. The difficulties and development situation of deep hole machining are summarized and its key technology is analyzed. Calories spread, scrap processing, tool guiding, machining system and machining technique are analyzed emphatically. At last, the research development of this field is discussed.

**Keywords:** Deep hole machining Machining system Machining technique Traditional processing

自18世纪初美国人发明扁钻以来,深孔加工(长径比 $>5$ )的研究一直没有间断。在20世纪初,由于战争对枪炮的大量需求,深孔加工技术也得到了进一步发展。由于深孔加工的巨大工作量和低成本(占孔加工的40%以上),使它成为制造业中难度最高而投入产出比最大的领域。特别是今天,机械工业面临多品种、小批量、新型工程材料以及愈来愈高的精度要求,深孔加工愈发成为关键,探索其加工的有效方法,具有重大意义。

## 1 深孔加工的难点及发展概况

### 1.1 深孔加工的难点

深孔由于其超大的长径比(在重型机械工业可达65以上)以及加工时的封闭和半封闭状态,决定了其加工过程有如下难点<sup>[1]</sup>:

(1)切削散热难。常规加工过程中80%的切削热应由切屑带走,但在封闭和半封闭的深孔加工中,润滑、冷却都很困难,热量扩散慢,工件、刀具成了主要散热体,热量积聚效应非常明显,导致刀具刃口温度

可达600℃,极大地影响了刀具耐用度。同时,已加工孔也发生热胀冷缩,严重影响孔加工精度<sup>[2]</sup>。

(2)工艺系统刚性差。深孔的长径比大,钻杆必然细长,刚性严重不足。加工时,易产生振动、扭曲、折断等问题。同时,孔的尺寸精度、位置精度及表面粗糙度都难以保证。

(3)排屑难。切削路程长,排屑空间狭窄,切屑排出很困难,容易与孔壁摩擦,孔加工表面出现螺旋沟。也易发生切屑阻塞,刀具容易磨损、崩刃,报废零件。

### 1.2 深孔加工的发展概况

深孔加工最初采用扁钻,后经改进,形成了麻花钻。这两种钻头,结构简单,制造方便,切削液也容易导入,适宜加工大尺寸范围的孔。但是,当加工深孔时,不便于冷却和排屑,刚性也很低,不适宜大进给量加工,生产率低。

20世纪初,为解决枪管的加工问题,美、英等国军事工业部门发明了枪钻。它将高压液体通过钻杆内通道送到刀头,带走铁屑和热量,并在钻头外径上加导向条,以保证正确的方向。但由于采用外排屑的方式,切屑与加工表面直接接触,影响加工表面质量,同时,受自身结构所限也不适于高效、精密加工。

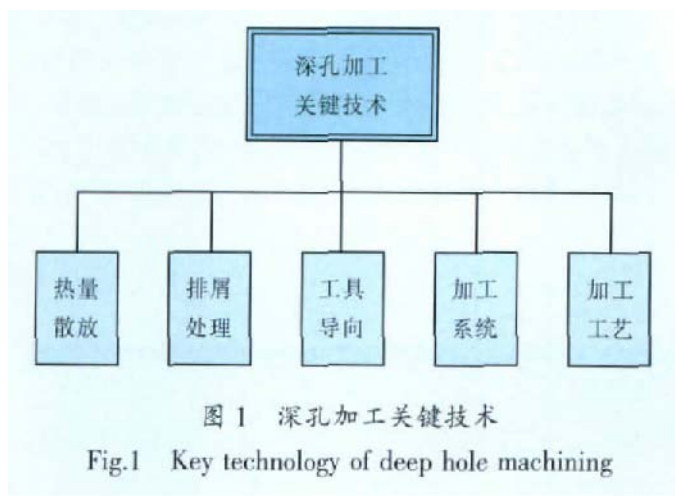
在第二次世界大战期间,为了满足高效加工枪炮的需要,1942年德国的Beisner发明了内排屑深孔钻,后经国际孔加工协会(Boring and Trepanning Association)的努力,形成了BTA方式。它在枪钻基础上增加了刚性,改善了排屑条件,提高了孔的表面质量。但它具有切削液压力高、密封困难的缺点。1963年,瑞典Sandvik公司利用喷吸效应,发明了喷吸钻法,将液体采用推吸联合作用,改善排屑过程,降低系统压力。70年代,日本冶金股份公司发明了DF(Double Feeder)单管喷吸钻,它结合了BTA法和喷吸钻的优点,将原双管系统改为单管,增加了一个专门起吸效应的油压头,使钻杆系统刚性增加。

20世纪80年代,王峻等人在总结归纳传统深孔加工的基础上,发明了SIED(单管内排屑喷吸钻)技术,这种技术完善了DF钻的抽屑容器设计,使抽屑能力大大增强,并对内排屑钻头进行了优化设计,构

成了以单边刃切削、单管内排屑喷吸钻加工、自导向为特征的工具,使钻头可以不带断屑台而实现重磨,成为当前非常先进的一种传统加工技术<sup>[3]</sup>。

## 2 深孔加工的关键技术

深孔加工由于其特殊性,导致切削热量散放、切屑处理、钻头正确导向成为保证加工质量的关键技术,对这些问题解决的程度,极大地影响了加工质量。同时,根据所采用的钻头选用相应的加工系统,根据不同的工件采用不同的加工工艺,共同支撑了加工的高效、高精度顺利进行。这些因素组成了深孔加工的关键技术<sup>[4]</sup>,如图1所示。



### 2.1 热量散放

在深孔加工中,切削液是热量散放的重要介质,它能冷却刀具和工件,减少热变形,提高刀具耐用度。同时,润滑刀具表面、清洗切屑,减少摩擦。但实践中没有这样一种万能切削液。因此,必须根据工件材料性质、加工方法、加工精度、刀具材料等条件正确合理地选择切削液<sup>[5]</sup>。

在切削液类型的选用上,要根据主要目的是以减小摩擦力为主还是以冷却为主,而分别选用润滑性或冷却性的切削液。

当按切削条件选用时,切削速度是主要依据。高切削速度时,应选用浸透性好、黏度低的乳化液或离子切削液,以冷却刀具。低速重切削时,油性强、润滑性能好、高黏度的切削液应为首选,以增大润滑、减少机械磨损。

当按孔径大小选用时,低黏度切削液适用于小直径深孔,以便降低黏滞阻力,减少液体能量损失。而大、中直径孔加工时,可选用黏度大一些的切削液。

同时,选用切削液还要考虑工件材料。如果工件

与刀具亲和力和大,应选用极压切削油。氟基切削液用于低速加工碳素钢、低合金钢。加工铜时,不应该选用含硫的切削液,以免腐蚀。

另外,切削液合适的流量和压力,能使切削液到达切削区域,达到冷却润滑刀具、工件的作用,并清洗工件,将切屑顺利排出(见表1)<sup>[6]</sup>。

表1 加工方法与切削液压力、流量参考值

方法	压力/MPa	流量/(L·min <sup>-1</sup> )
枪钻	3.5~10	10~60
BTA	2~6	50~250
喷吸钻	1~2	30~150
DF	1~4	30~150

注:进给量大时,压力和流量要增加。

### 2.2 排屑

深孔加工中,切屑处理非常重要,它直接影响孔加工的质量,甚至决定加工过程是否可行。应该从分屑、卷屑、断屑等方面控制切屑成C屑或瓦片状屑,通过高压、大流量的切削液或压缩空气等介质,采用内排屑或外排屑的方式,将切屑排出或者采用负压方式抽屑。如果加工一些难加工材料(如钛合金、奥氏体不锈钢等),很难实现断屑,则应采用正交组合试验法和极差分析法确定最佳参数,控制切屑宽度和厚度,形成窄而薄的长条屑排出。

### 2.3 合理导向

深孔钻必须设计导向块,并以两个导向块和一个副切削刃的结构确定其径向尺寸,使作用力与切削刃上的力保持平衡。同时,采用合理的辅助支撑装置,增加减震器,刀杆制作有导引部分,解决钻杆刚性不足,钻孔走偏,从而减轻钻杆刚性不足带来的负面影响。

### 2.4 加工系统

深孔加工必须根据采用的加工方法选择相应的加工系统。按照冷却、排屑装置分类,现在仍沿用的有4类<sup>[6]</sup>:枪钻系统、BTA系统、喷吸钻系统和DF系统。同时,SIED系统正在逐渐推广应用。它们各有特点,应合理选择。

(1)枪钻系统采用钻杆内部通入高压切削液的方式进行润滑、冷却,并将切屑从孔内壁与刀杆V形槽之间排出。其缺点是:外排屑方式,容易擦伤已加工表面;采用V形槽,降低了刀杆刚度,导致低生产率。因此,该系统仅适用于加工直径 $\phi < 20\text{mm}$ 的深孔。

(2)BTA 系统应用范围比较广,它采用内排屑方式,高压切削液从孔内壁和钻杆外壁之间的环形空间进入,进行润滑冷却,将切屑从钻杆内部推出。钻杆是管状的,改善了钻杆刚度,因而可以进行大进给量高速度切削。其缺点是:受钻杆内排屑空间限制,主要用于直径  $\phi > 12\text{mm}$  的深孔。

(3)喷吸钻系统采用双层管刀杆,利用流体力学的喷射效应,将切屑从管内吸出。由于采用双层管刀杆,刚度较高,可以大进给量加工。但由于刀杆采用双管结构,进一步限制了排屑能力,也无法抑制刀杆的振动。因此,该系统主要适用于直径  $\phi > 18\text{mm}$  的深孔。

(4)DF 系统结合了 BTA 方法和喷吸钻排屑的方法,采用双进油装置,仅用一根钻杆完成推压、吸收切屑,因此,它具有 BTA 系统和喷吸钻系统的优点,提高了加工精度和加工效率,并且最小加工直径可达 6mm。

(5)SIED 系统以单管内排屑喷吸钻作为深孔钻削的基本统一模式,以“分调式功率增补型喷吸钻抽屑装置”作为强大后盾,实现 SIED 机床不同工件及其加工的全方位兼容,是一种正在逐渐推广的系统,也是目前较先进的系统<sup>[7]</sup>。

### 2.5 加工工艺<sup>[1,8]</sup>

加工工艺主要根据零件结构特征、加工方法和设备状况等因素来决定。深孔加工设备是刀具和加工方法的载体,可以采用专用设备,也可以仿制、改造普通机床,主要取决于加工工件、加工方法和所采用的加工方式。此外,针对深孔加工难点,还需从刀具、定位基准等方面进行调整来满足加工要求。

根据零件材料性质、深孔加工精度、技术要求等条件,选择相应

的加工方法和刀具(见表 2、3)<sup>[2]</sup>。同时,根据零件特征,选择便于装夹、加工、易保证尺寸精度的面作为定位基准。当加工精度较高时,还需要合理划分粗加工、半精加工和精加工,甚至光整加工,并安排热处理、表面处理等辅助工序。在加工时,还需确定合理的加工进给量(见表 4)和工序加工余量(见表 5)。当前,由于深孔机床的高速发展,现在已经能够实现高效、精密和集中加工,特别是采用 SIED 技术,可避免零件多次装夹误差。

## 3 深孔加工发展

### 3.1 特种加工

传统深孔加工采用机械方式去除多余材料,具有一些固定缺陷,例如刀具材料硬度必须高于工件硬度,切削力大,工件残留应力,容易变形,劳动强度大,加工环境恶劣等<sup>[1]</sup>。当面临航空航天部件复杂型面、微元器件,或者工件超硬、超软、高精度、高质量、复杂形

表 2 加工方法和刀具所适用的加工范围

加工方法	加工刀具	加工孔径/mm	尺寸精度	圆度误差/ $\mu\text{m}$	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$
深孔钻削	扁钻	25~450	IT11~IT14	$\geq 40$	10~2.5
	深孔麻花钻	1~75	IT11~IT14	$\geq 40$	20~5
	枪钻	2~50	IT7~IT10	5~10	5~1.25
	DF 钻	6~65	IT7~IT10	5~15	3.2~1.25
	BTA 钻	6~80	IT7~IT10	5~15	5~1.25
	喷吸钻	18~45	IT9~IT10	10~40	5~1.25
深孔镗削	BTA 套料钻	47~500	IT9~IT12	$\geq 20$	5~1.25
	外排屑深孔镗刀	2~50	IT8~IT11	10~80	5~1.25
	BTA 镗刀	$\geq 20$	IT8~IT11	10~80	5~1.25
	浮动镗头	$\geq 50$	IT8~IT11	10~40	5~1.25
深孔铰削	组合镗头	20~220	IT8~IT11	10~40	3.2~1.25
	多刃铰刀	10~60	IT8~IT11	10~40	3.2~0.2
	单刃铰刀	10~60	IT6~IT10	5~10	3.2~0.2
深孔磨削	金刚石铰刀	3~100	IT7~IT10	5~10	1.6~0.2
	深孔磨削	大、中孔径	IT8~IT10	10~40	3.2~1.6
深孔珩磨	深孔珩磨	2~1200	IT6~IT9	5~30	0.8~0.2
	滚压	滚压头	$\geq 6$	IT5~IT9	5~30

表3 加工刀具材料选择<sup>[2]</sup>

被加工材料	类别	结构钢合金钢	高温耐热合金钢	氮化钢	不锈钢	钛与合金	铸铁
	代表型号	45、40Cr、50CrNiMo、35CrMo	18MnMoNbNi、20CrJMo4V、20CrJMoJVtIB、2Cr12NiMoWV、25Cr2MoV	38CrMoAl	1Cr18Ni9Ti	—	—
硬质合金	类别	YT类	YM类	YT类	YM、YG类	YG类	YG、YT类
	牌号	798、YTS25、YT15	YW3	767	YW3、813、YG8	YG8、813	YG6、YG8、YTS25

体结构时,传统机械加工难以达到要求。自1943年拉扎林柯发明电火花加工方法后,利用机械以外的非传统方式加工深孔零件得到了大量的研究,形成了特种加工这一新的发展领域(见表6)<sup>[9]</sup>,可以实现超硬、超软、超精、超光和超微等加工。

### 3.2 数控加工<sup>[10]</sup>

深孔加工当前面临多品种、小批量、高精度、高效

率加工,传统手动加工难以适应这种状况。而现代数控机床的发展,计算机辅助设计/制造(CAD/CAM)和成组技术的应用,极好地适应了这种形势,并越来越多地得到推广和应用。深孔数控加工与常规加工相似,需要解决刀具选择、合理切削用量、排屑、冷却钻头等问题,更要使加工周期优化<sup>[10]</sup>。当前,大量新材料(如陶瓷、硬质合金等)应用于机夹刀具,非常适合数控加工。国内,德隆机床有限公司已经开发了钻深达13m的钻镗床,12m的珩磨机床等系列深孔数控加工机床。德国TBT公司研制的CNC深孔加工机床可以同时加工27个深孔。

### 3.3 干式加工

近年来,由于对环保的需要,干式加工得到越来越多的重视<sup>[11]</sup>。干式加工采用无切削液加工的方式,既避免了污染,又降低了切削成本,是一种绿色制造技术。当前如采用完全无切削液方式加工,切削热量难以完全处理,因此采用切削液雾化与水基(油基)混合进行降温或者低温冷却实行亚干式加工。该种加工方式要求刀具材料耐热、耐高温、耐磨,常选用YD15等特殊材料作刀片,并进行试验优化参数。

表4 中碳钢、合金钢进给量

加工方法	枪钻	高速钢内排屑钻	BAT	喷吸钻	DF
进给量/(mm·min <sup>-1</sup> )	40~80	32	60~90	60~90	90~250

表5 工序余量

加工方法	半精镗	精镗	精铰	粗珩磨	精珩磨
加工余量/mm	3~8	1~2	0.5~1.5	0.4~0.8	0.02~0.04

注:工件长度1 000mm~4 000mm。

表6 深孔特种加工

加工方法	能量来源及形式	作用原理	应用范围
振动钻削加工	振动能	振动改变刀具、工件位置,解决断屑和排屑	小直径深孔
电解加工	电化能	金属离子阳极溶解	难加工材料,电解钻孔、抛光
电火花加工	电能、热能	熔化、气化	微小深孔钻、磨加工
加热辅助切削	热能、机械能	热能改变工件加工性能	难加工材料
磁化切削	磁能、机械能	磁化刀具和工件	难加工材料
超声加工	声能、机械能	磨料高频撞击工件	珩磨、滚压
高能束加工	电能	激光束、电子束、离子束撞击工件	微小深孔

## 4 结束语

深孔加工是一项综合技术,在理论和技术方面都不是很完善。随着微电子技术、数字化技术、材料技术、信息技术等的迅猛发展和不断融合,以及竞争激烈的市场需求,深孔加工必将获得进一步发展,从而在我国制造产业中发挥更大的作用,该技术对加速我国由“世界制造大国”向“世界制造强国”的转变具有重大现实意义。

(下转第97页)

