

# 45号钢深孔枪钻切削实验与仿真分析

张小粉

(咸阳职业技术学院机电(技师)学院陕西 西咸新区 712046)

**摘要:**切屑形态对枪钻深孔加工中孔成型精度影响极大, 钻尖生成的切屑易堵塞在V型排屑槽中, 或缠绕在钻头上, 合理的断屑、排屑是保证加工顺利进行的前提。本文采用硬质合金枪钻对45号钢进行深孔加工实验, 采用单因素实验法研究切削速度、进给量对切屑形态的影响规律, 观察发现切削速度较低时, 主要为带状切屑, 切削速度较高时, 主要为单元切屑, 当切削速度保持不变时, 随着进给量的增大, 切屑的主要形状从长带状向单元切屑逐渐转变。当进给量保持不变时, 随着切削速度的增大, 切屑尺寸从大变小再重新变大。利用Deform-3D有限元仿真法模拟深孔加工中切屑的形成过程与形态、断屑方式, 并数值计算轴向力与扭矩、切削过程温度等过程量, 为切削过程控制提供理论依据。最后, 实验结果表明, 加工效率相同的情况下, 低切削速度、高进给断屑效果往往比高切削速度、低进给的断屑效果要好。

**关键词:**深孔加工; 枪钻; 切屑形态; 仿真分析

**中图分类号:** TG52

**文献标志码:** A

**文章编号:** 94047-(2020)02-009

枪钻是深孔加工常用工具, 因其工艺便捷得到广泛应用, 但深孔加工处于封闭或半封闭状态, 排屑空间相对较小, 孔加工质量不容易得到保证, 限制了其使用。枪钻加工中形成的切屑, 形状与大小关系到排屑是否流畅, 间接的表征其切削性能的优劣<sup>[1,2]</sup>, 且切屑伴随切削立刻发生, 便于观察, 可作为现场调整工艺参数的依据<sup>[3]</sup>。切削速度与进给量是影响深孔加工质量的关键因素<sup>[4,5]</sup>, 高压冷却液、工艺系统刚性也会影响到切屑形态<sup>[6-8]</sup>。近年来, 有限元技术已用在切削过程中轴向力研究<sup>[9]</sup>, 部分的替代实验。切屑形态分析已经成为深孔加工过程的重要依据<sup>[10-12]</sup>。本文运用实验手段对枪钻深孔加工产生的切屑形态进行观察, 并运用有限元仿真手段揭示其与切削速度、进给量之间的联系。

## 1 45号钢棒料深孔枪钻切削实验

### 1.1 深孔钻工艺分析

#### 45号钢棒料及热处理工艺

45号钢的热处理方法主要是淬火处理和调质处理。45号钢棒料在进行深孔钻削前, 首先进行调质处理, 目的是为了减少残余应力或工件材料硬度不均对加工过程产生的影响, 调质处理后, 工件具备

良好的机械性能, 主要应用于轴类、齿轮、螺栓等重要零件。本实验中45号钢棒料采用调质处理+表面淬火处理, 目的是提高工件表面硬度, 获得良好的综合机械性能(图1), 调质处理后布氏硬度大约为380~470HB。此外, 调质处理后的工件使用矫直机矫正(图2), 防止在钻削加工过程中轴线出现严重的偏斜。

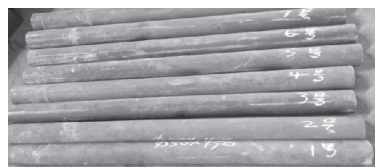


图1 调质处理后的工件

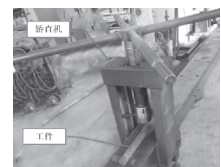


图2 矫直机矫正

### 枪钻切削加工工艺

枪钻钻头选择硬质合金材质, 为非平衡钻头, 钻削过程可能出现力不平衡。事先加工引导孔, 有利于保证加工孔质量的前提下, 缩短加工时间, 提高枪钻使用寿命。引导孔使枪钻侧面受到支撑, 径向进行约束。由于机床自身参数限制, 本实验研究的枪钻钻削45号钢工件, 采用普通钻削, 暂不考虑高速钻削。深孔加工工序采用硬三爪定位、夹紧工件, 按照打点→车外圆→车端面→预钻引导孔→修正引导孔→钻深孔的加工顺序。工件加工过程如图

收稿日期: 2020-01-01

作者简介: 张小粉(1977—), 女, 陕西渭南人, 硕士, 讲师, 主要从事机械加工方面的教学与研究工作。

3所示。引导孔的工艺要求见图4(a)，实物如图4(b)。深孔切削过程顺序为：①低速进入；②打开冷却液；③提高切削速度；④进刀（不能爬行）；⑤达到深度时关闭冷却液；⑥停转，然后快速退刀。

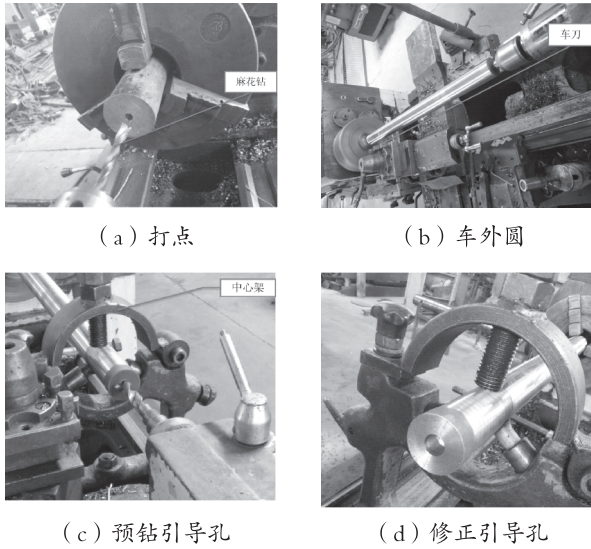
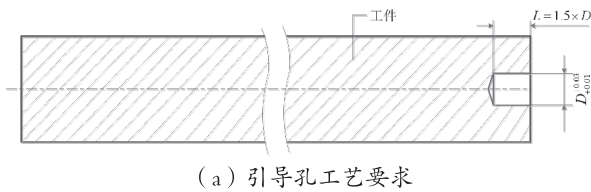
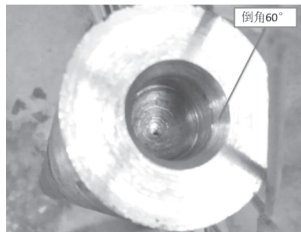


图3 工件加工工序



(a) 引导孔工艺要求



(b) 引导孔实物

图4 引导孔

### 切削参数确定

对切削参数的选取依据枪钻材料（直径

20mm的硬质合金）和工件材料（45号钢），通过查阅机械手册并结合生产经验，确定切削用量范围： $v_c$ 为40~80m/mm， $f$ 为0.025~0.065mm/r。下面采用单一因素实验法分别分析切屑形态随切削参数的变化规律。实验方案见表1。

表1 实验方案设计

切削参数	选取数值
切削速度(m/min)	40、50、60、70、80
进给量 (mm/r)	0.025、0.035、0.045、0.055、0.065

### 1.2 实验设备与工件

#### 加工机床

采用西安瑞石机械有限公司改装的深孔加工机床Z2115（图5），该机床由西安机床厂制造，可满足 $L/D > 10$ 深孔加工，加工孔径可达35mm，深度可达1600mm。

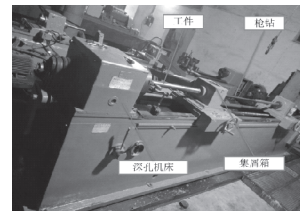


图5 深孔钻床

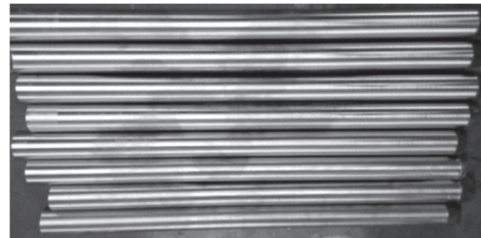


图6 实验工件

#### 工件

试验材料选用调质处理后的45号钢（图6），直径为50mm，长度为750mm，化学成分见表2

表2 45号钢的化学成分

钢号	化学成分（质量分数）							
	Mn	C	Si	Ni	Cr	Cu	S	p
45号钢	0.50~0.80	0.42~0.50	0.17~0.37	≥0.30	≥0.25	≥0.25	≥0.03	≥0.03

### 刀具

根据加工材料及机床，选用硬质合金枪钻（图7），钻头几何参数见表3，钻头直径20，钻头长度50，钻柄直径25，总长1200（单位：mm），钻尖如图8所示。

表3 钻头的主要几何参数

外角	内角	外刃后角	油隙角
20°	15°	10°	30°
内刃后角	钻尖偏心量	转折角	槽型角 $\theta$
10°	5	30°	120°

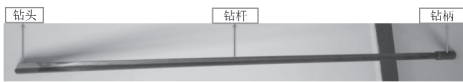


图7 硬质合金枪钻

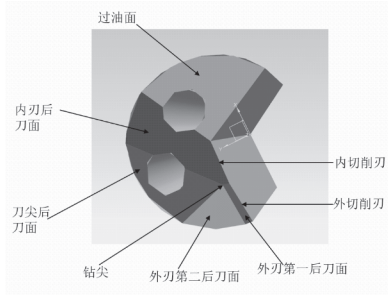
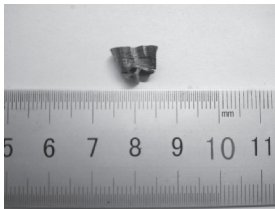


图8 枪钻钻尖

### 1.3 实验现象与结果分析



(a) 单元切屑



(b) 带状切屑



(c) 挤裂切屑



(d) 崩碎切屑

图8 枪钻加工切屑类型

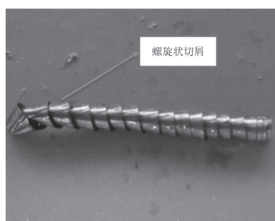


图9 钻头钻出时切屑状态

枪钻加工过程中, 选择不同工艺参数, 可能会产生多种形态的切屑, 主要有单元切屑、带状切屑、挤裂切屑和崩碎切屑(图8), 当钻头即将钻出时切屑呈现螺旋状(图9)。本实验利用切屑的卷曲状态、颜色及表面判断钻削过程是否合理。钻削加工时, 枪钻的内刃和外刃参与材料切削, 产生的切屑在前刀面上沿垂直刀具内、外切削刃的方向移动, 应力产生于切屑的交界处, 从而使得切屑向上卷曲, 内刃切削速度小于外刃切削速度, 内刃所产生的切屑流速小于外刃切屑流速, 导致切屑向内

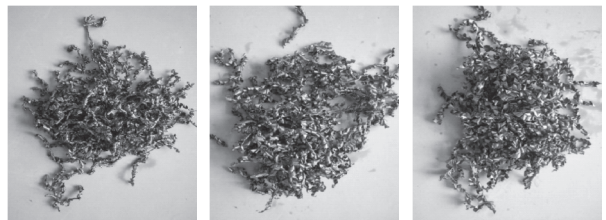
刃方向卷曲。在高压切削液的作用下, 切屑与枪钻或工件产生碰撞, 切屑断裂, 并沿着V型槽排出。

实验现象与结果分析: 在枪钻加工45号钢过程中, 外、内刃产生的切屑受切削液冲击与孔壁约束共同作用, 导致内刃切屑成扇片状。内刃、外刃产生的切屑相互扭在一起, 在切屑冷却液压力的作用下产生具有一定长度的切屑, 并随着切削液沿V形槽向外排出。多种因素组合下, 当出现排屑障碍时, 会堵塞在集屑箱, 导致导杆颤动并出现噪音现象。切屑的形状和宽度应在合理范围, 不能出现过长的切屑, 卷屑、分屑和断屑对排屑非常关键, 切屑宽度通常为排屑孔的1/4~1/5; 切屑不应呈现螺旋状和长带状, 而应呈卷曲状; 当被加工孔直径为20mm时, 切屑长度不宜超过12mm, 以便于清理切屑, 保护机床和人员安全。影响切屑形态的因素有工件、刀具、切削条件三方面因素, 工件的材料、切削参数和枪钻的几何参数是影响切屑形态的关键因素。

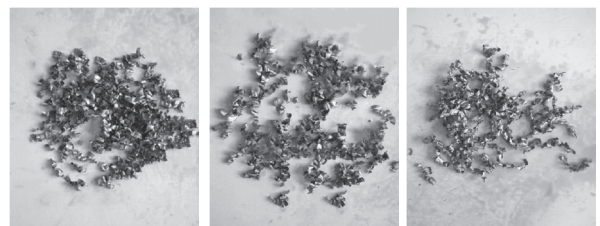
1.3.1 切削参数对切屑的影响分析 为了更好的观察切屑随工艺参数改变的变化规律, 设计了2组对比试验, 分别在固定切削速度下与固定切削进给量下进行试验, 在实验过程中进行收集切屑, 观察切屑形态和记录相关数据, 同时观察钻杆振动以及刀具磨损情况, 若出现紧急情况, 则停止加工。

#### 1 恒定切削速度

第1组选区切削速度70m/min, 进给量分别取0.015mm/r、0.025mm/r、0.035mm/r、0.045mm/r、0.055mm/r、0.065mm/r进行试验。如图10为切屑形态随进给量的变化规律。



(a) 0.015mm/r (b) 0.025mm/r (c) 0.035mm/r

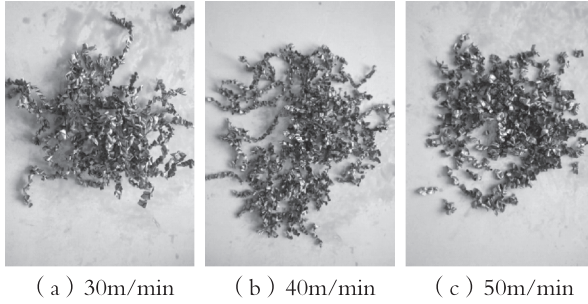


(d) 0.045mm/r (e) 0.055mm/r (f) 0.065mm/r

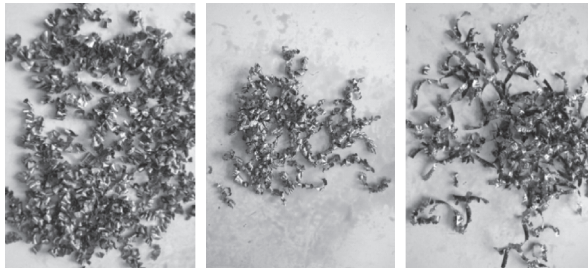
图10 恒定切削速度, 切屑形态随进给量的变化

## 2 恒定切削速度

第2组选取进给量 $0.045\text{mm/r}$ ，切削速度分别选择  $30\text{m/min}$ 、 $40\text{m/min}$ 、 $50\text{m/min}$ 、 $60\text{m/min}$ 、 $70\text{m/min}$ 、 $80\text{m/min}$ 进行试验。如图11为切屑形态切削速度的变化规律。



(a)  $30\text{m/min}$  (b)  $40\text{m/min}$  (c)  $50\text{m/min}$



(d)  $60\text{m/min}$  (e)  $70\text{m/min}$  (f)  $80\text{m/min}$

图11 恒定切削进给量，切屑形态切削速度的变化

## 3 结果分析

由第1组实验能够发现，大部分的切屑尺寸随进给量的增大而减小，且断屑效果明显增强。这是由于随着进给量的增大，钻削厚度相应增大，导致切屑厚度也随之增大，切屑刚性有效提高，其卷曲半径而变小，从而使得侧向卷曲变强，切屑容易折断。

由第2组实验能够发现，在一定范围内提高切削速度对断屑有促进作用，但是在高切削速度时，断屑效果并不明显，还导致断屑效果恶化的情况（ $v_c=80\text{m/min}$ ， $f=0.045\text{mm/r}$ ），出现此种情况是因为切削速度过高，使得钻削温度上升过高，虽然进给量比较大，对断屑有利，但是钻削力和钻削温度也会增加，这会使得钻头磨损加剧，加上切屑变软，从而影响断屑效果。

此外，进给量并不是越大越好，其对断屑的影响效果也在一定范围之内，在第1组切屑图中能够看出，进给量 $f=0.065\text{mm/r}$ 时产生的切屑长度，大于进给量 $f=0.055\text{mm/r}$ 时产生的切屑长度。实验中还发现，加工效率相同的情况下，低切削速度、高进给

量产生的断屑效果往往比高切削速度、低进给量的断屑效果要好。这是因为，高切削速度会导致过高的温度，影响断屑效果。低速高进给短屑形态如图12所示，切屑较厚而短；高速低进给短屑形态如图13所示，切屑薄而长。

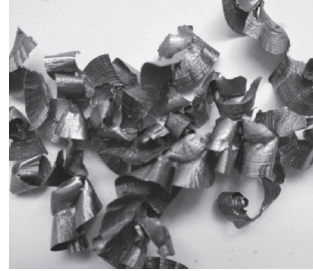


图12 低速高进给短屑



图13 高速低进给短屑

1.3.2 刀具磨损分析 钻头表面粗糙度差，易造成在加工过程时出现蹦刀情况，导致钻头磨损严重。随着重磨次数的不断增加，产生的钻屑形态不稳定，并出现断刀、切屑缠刀或堵屑等状况。图14为切屑缠刀情况。图15为枪钻磨损后的切屑形态，磨损后的钻头加工出的切屑表面会出现明显的横纹。

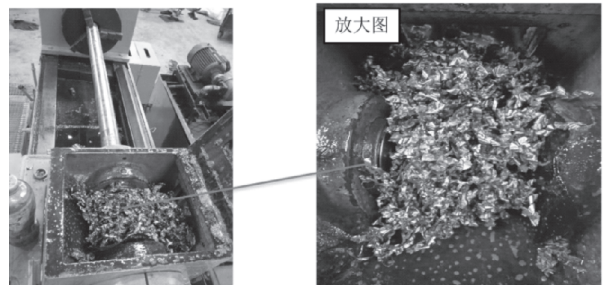


图14 切屑缠刀

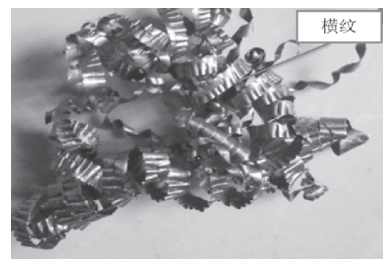


图15 枪钻磨损后的切屑

## 2 Deform-3D仿真分析切屑形成

由于深孔加工过程通常是处于封闭或半封闭的环境之中，很难实时监测刀具的加工状态、切屑形成及其变形过程。因此，运用Deform-3D有限元软件对枪钻钻削过程进行仿真分析，模拟切屑的形成，观察并分析切削过程稳定性。

2.1 模型建立与网格划分

2.1.1 模型建立 在模拟仿真中应首先建立材料的本构模型，体现材料应力和应变之间的关系。在仿真过程中由于刀具的硬度往往比被加工工件的材料硬度大许多，所以其产生的变形量往往不予考虑。在仿真软件中定义刀具的材料模型为刚性体（Rigi

d），忽略其变形量，能提高计算效率，且符合实际情况。被加工工件定义为刚塑性体（Plastic），获取其应力、应变和温度等。

Deform-3D中设定材料模型为AISI-1045，即国标普通45号钢，泊松比为0.3，杨氏模量随温度的变化而改变，力学性能见表4。

表4 工件材料（45#钢）的力学性能

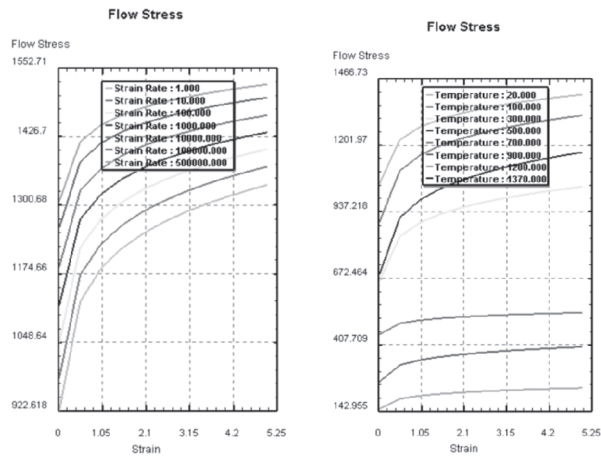
材料	抗拉强度 $\sigma_b$ (MPa)	屈服强度 $\sigma_s$ (MPa)	伸长率 $\delta_s$ (%)	断面收缩率 $\psi$ (%)	冲击功 $A_{kv}$ (J)	冲击韧性值 $\alpha_{kv}$ (J/cm <sup>2</sup> )	未热处理
45号钢	≥600	≥355	≥16	≥40	≥39	≥49	≤229HB

本文工件材料本构模型选择Oxley模型。在有限元Deform-3D仿真中，45号钢的材料本构模型可以表示为：

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T) \quad (1)$$

式中： $\bar{\sigma}$ -流动应力（Mpa）； $\bar{\epsilon}$ -为塑性应变； $\dot{\bar{\epsilon}}$ -为应变率；T-温度（℃）。

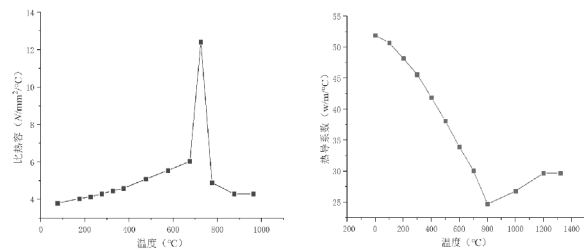
此仿真软件材料库中提供了关于AISI-1045的应力应变数据，对提升仿真效率具有很大帮助。如图16为AISI-1045流动应力随（温度为500℃）、应变率（应变率为100/s）的变化图。



(a) 动应力随温度的变化（温度为500℃） (b) 流动应力随应变率的变化（应变率为100/s）

图16 AISI-1045流动应力随温度、应变率的变化

工件材料选择的是刚塑性材料模型，因此不考虑热胀系数、杨氏模量及材料的泊松比。在此定义的枪钻为刚性体，不予考虑刀具变形，但是需进行热传导计算分析，要对刀具和工件的比热容及热传导系数进行定义。AISI-1045的热导系数和比热容随温度变化规律如图17所示。仿真工件为Φ50mm×750mm的45号钢棒料，其模型为圆柱体，由于模拟加工设置长度过长会使得仿真时间成倍增加，为了提高仿真效率，只对钻头仿真切削区域进行建模，因此将45号钢棒料工件简化为直径为40mm，厚度为12mm的柱体。



(a) 45号钢的比热容 (b) 45号钢的热导系数

图17 AISI-1045的比热容与热导系数

由于枪钻钻杆较长（1200mm），刀具网格数量就会很多，且对计算机的性能要求更高。因此，为提高仿真计算效率，仅对枪钻的钻削部分进行简化建模（图18）。选用YG8硬质合金钻头，其物理性能见表5，机械性能及化学成分见表6。

表5 Yg8硬质合金钻头的物理性能

类型	泊松比	杨氏模量 (GPa)	导热系数 (W/m/℃)	线膨胀系数 10 <sup>-6</sup> /℃	热熔 (N/mm <sup>2</sup> /℃)
YG8 硬质合金钻头	0.22	640	75.4	4.5	15

表6 Yg8机械性能及化学成分

类型	化学成分%	硬度 (HRC)	耐热性 (℃)	冲击韧性 (KJ/m <sup>3</sup> )	抗弯强度 (Gpa)
YG8 硬质合金钻头	WC (92) CO (8)	89.0	800~1000	25~60	1.47

2.1.2 网格划分 网格划分是切削仿真中关键的步骤。为了保证钻削仿真的正确性，对仿真对象进行网格重划分，并防止出现不合格的网格单元。网格划分采用自适应网格划分技术（AMG），程序将在工件形变量超过设定变量数值时对工件进行网格重划分。在钻削仿真过程中，钻削力和温度主要集中在钻头与工件的接触区域，所以对钻头与工件将接触的中心部分进行网格重划分，这样不仅能提高仿真精度，还能减少运算量，提升效率。通常在网格重划分时，需要进行权重设置，保证影响切削深度实际值和进给量的关键因素在内，最大限度减少几何失真。综上考虑，按照图19进行权重设置，这样将会极大改善几何失真。工件和刀具网格划分结果如图20所示。

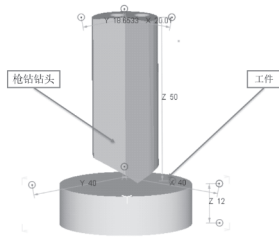


图18 枪钻钻削45号钢模型

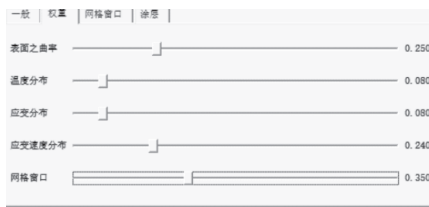
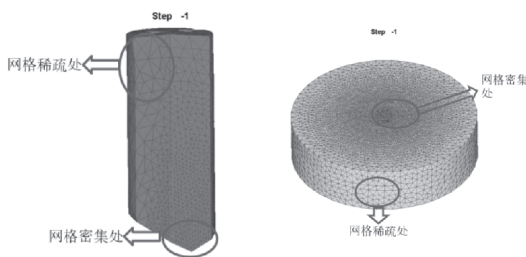


图19 网格重划分的权重



(a) 钻头网格划分 (b) 工件网格划分

图20 工件和刀具网格划分效果图

## 2.2 仿真结果分析

### 2.2.1 切屑形成机理分析

#### 切屑生成分析

图21为钻头进给时切屑形态的变化情况（ $v_c=40\text{m/min}$ ,  $f=0.025\text{r/mm}$ ），可以看出：枪钻加工时，内刃生成的切屑的速度远远小于外刃生成的

速度，生成切屑形态也有区别。内外刃夹角的存在，会导致外刃切屑向钻头中心集聚的过程中受到内刃切屑的阻力作用，在加工孔和高压切屑液的共同作用下形成螺旋卷屑。切屑形成机理如图22所示。

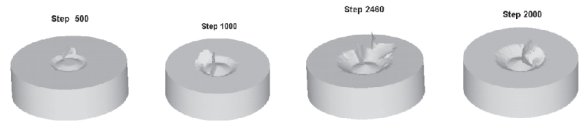


图21 随着钻头进给切屑形态的变化情况

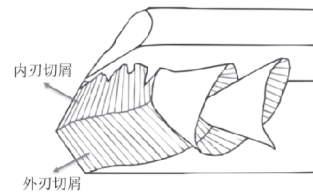
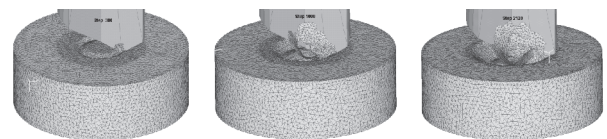


图22 切屑形成机理

#### 切屑断裂分析

钻削时切屑形成过程如图23所示。在有限元仿真过程中，连续切屑的形成是通过网格重划分模拟的，切屑断裂是通过设置断裂准则实现，当达到大压力和变形时，那些网格单元就会被删除，从而实现切屑断裂。钻削过程中，切屑折断是沿网格边界发生的，所以网格划分越细，与工件材料实际的晶界越接近，模拟仿真的精度就会越高。但是实际仿真中，网格尺寸与工件材料的晶粒大小相比，相差很大，所以仿真中产生的切屑效果与实际钻削加工产生的切屑进行比较，存在较大差距。



(a) 300步 (b) 1000步 (c) 2120步

图23 枪钻钻削时切屑形成过程（ $v_c=40\text{m/min}$ ,  $f=0.025\text{mm/r}$ ）

#### 切屑形态分析

刀具内刃产生的切屑为左旋，而外刃产生的切屑为右旋连续卷曲，切屑的曲率直径如图24(a)，达到7.26mm，切屑的深度如图24(b)所示，约4.44mm。此外，从图24看出钻头产生的切屑呈现向上卷曲状态，这是由于底层与表层金属切屑所流出速度存在区别而导致弯曲变形，且切屑在底层流出时与刀具前刀面存在阻力，在摩擦作用下产生热量，导致二次塑性变形，使得切屑呈现卷曲。在切

屑宽度方向上，主切削刃上各点的速度存在差异，导致切屑在在宽度方向上呈现侧向卷曲。在钻削过程中，两种卷曲方式同时存在，产生的切屑螺旋上升，当切屑的变形量大于工件材料的断裂极限时，切屑发生折断。

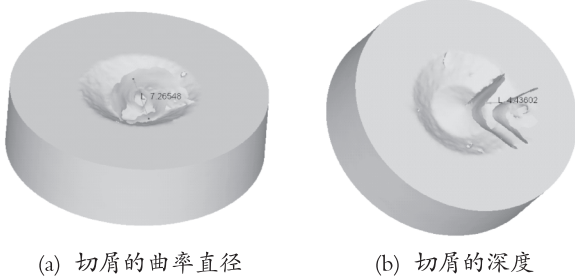


图24切屑形态

轴向力与扭矩分析

图25为径向力曲线图，钻头在X、Y、Z三个方向的分力分别为 $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ ，其中 $F_z$ 为轴向钻削力。 $F_x$ 、 $F_y$ 为径向力， $F_x$ 、 $F_y$ 的合力为 $F_p$ ，径向合力 $F_p$ 不为零，模的大小与方向随时发生变化，径向力随时间的推移逐渐增大，并趋于稳定。

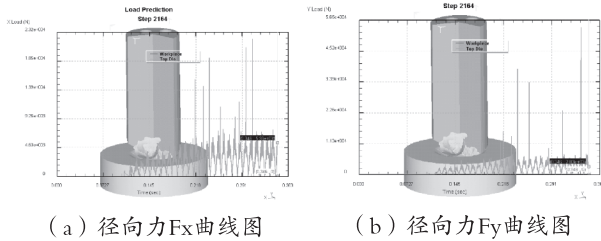


图25 径向力曲线图 ( $v_c=40\text{m/min}$ ,  $f=0.025\text{mm/r}$ )

图26为钻削力与扭矩曲线图，可以看出：轴向力和扭矩随着钻头切削深度的增大不断上升，当钻到一定深度后保持稳定。呈现这种趋势的原因是开始阶段参与切削的内刃、外刃与工件接触宽度逐渐增大，当钻头切削刃都参与切削后，钻削力会在一定范围内保持不变。此外，还能看出在钻削过程还存在变形，这是因为模拟仿真过程的迭代计算属于非线性的计算过程，网格会自动重划分，因此在钻头钻削过程中会产生畸形变异点。从图26 (a) 轴向力曲线图可以看出，当钻头开始接触加工工件时，切削力会很快增大到一定值，然后在一定的范围内不波动。原因是钻头初期接触工件时，工件会受到钻头上切削刃的作用产生强烈的塑性变形，而切削力为抵消产生的塑性变形，所以增大到一定的值。在枪钻钻削45号钢时，会产生切屑，网格会发

生破裂失效，此时切削力就会减小。

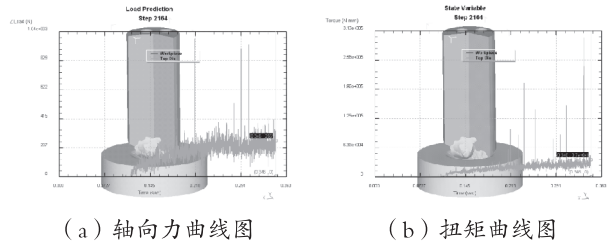


图26 轴向力与扭矩曲线图 ( $v_c=40\text{m/min}$ ,  $f=0.025\text{mm/r}$ )

切削温度分析

由图27可以看出：随着枪钻切削加工的进行，工件的温度逐渐上升，工件待加工表面的温度在一定时间内基本呈线性上升。提取5个特征点分别为距离工件由远到近以及刀具附近和切屑部位（图27a），将特征点的温度变化制作成曲线进行分析，得出：特征点3离钻头是最近的，温度上升最快，数值也是相对最高的；特征点1、2离钻头由远到近，温度变化由慢到快；且特征点1、4、5的温度波动比较大，归咎于钻孔过程中摩擦、挤压产生的热，是工件、切屑、空气热交换的共同作用。贴近钻头的部分材料的温度也会随着刀具钻头的旋转呈现周期性增加，且整体呈现不断上升的趋势。这是因为钻头在转动的过程中与部分点周期性接触，呈现出波浪线形态。

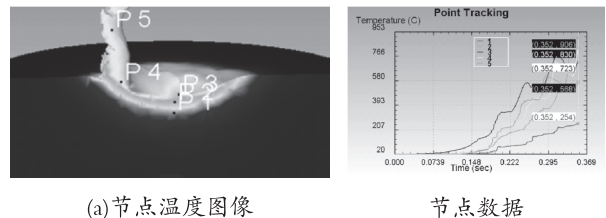


图27  $v_c=40\text{m/min}$ ,  $f=0.025\text{mm/r}$ 时剖面部分节点的温度图像

由图28可以看出：在枪钻下钻阶段，工件和转头由于摩擦作用，产生越来越高的温度。从钻头的温度场分布可以观察得到切削刃（内刃、外刃）区域温度最高，原因是内、外刃参与切削，工件产生

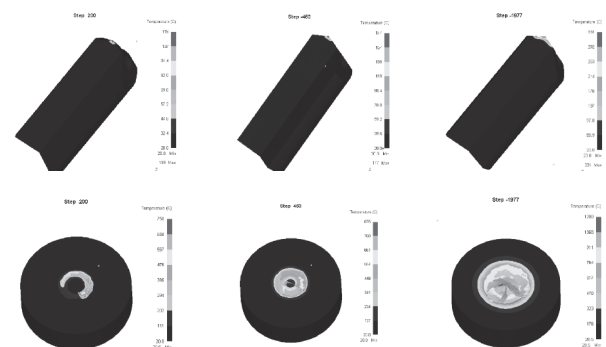


图28  $v_c=40\text{m/min}$ ,  $f=0.025\text{mm/r}$ 时仿真过程温度场分布

塑性变形，导致温度相对较高。除此之外，还可以看出最高温度产生在切屑底部，主要原因是产生此部分切屑时没有来得及进行冷却，后刀面摩擦进一步加强升温，所以温度比较高。

表7所示为 $v=40\text{m/min}$ ， $f=0.035\text{mm/r}$ 时，仿真步数所对应的最高温度数值。可以看出在钻头开始钻

削阶段，钻头的最高温度随着仿真步数的增大而提高，当钻削达到稳定阶段，最高温度也趋于稳定，基本与实际加工规律相吻合。图29为切削温度随切削参数变化图，由其可知最高切削温度随进给量和切削速度的增大而逐渐升高。深孔枪钻加工中，切削温度与进给量和切削速度都成正比。

表7 切削温度随仿真步数的变化

钻削步数	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500
温度(℃)	86	145	321	612	917	1245	1386	1450	1480	1490	1490

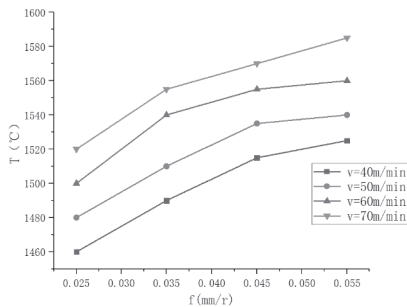


图29 切削温度随工艺参数变化图

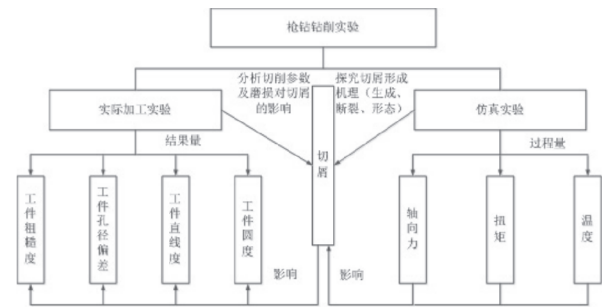


图30 枪钻切削实例实验与仿真实验分析联系

### 3 实际实验与仿真分析对比与总结

本次研究采用了实验方案验证，配合检测技术，应用仿真技术对切削过程进行模拟，应用数值分析以量化描述切削中的物理量，这两种技术手段的配合方式见图30。

由于深孔加工处于封闭或半封闭状态，无法实时观察切屑的形成过程以及尺寸测量，通过仿真技术能够探究切屑的形成机理，便于更深入的切屑形成过程分析，对实验结果进行部分的解释与推理。虚拟仿真与实际实验相互补充，互相促进，各有所长，仿真技术与实验的优缺点见下表。

表8 仿真技术与实际实验对比

	仿真技术	实际实验
优点	能够在刀具的设计阶段了解其性能及加工产品状况，动态模拟切削加工过程，可以进行刀具优化，从而达到缩短开发周期，节约成本的目的，获得更高的市场竞争力	能够准确的获取加工工件精度，比如被加工工件的粗糙度、孔径偏差、直线度等。
缺点	在物理仿真过程中所建立的三维仿真模型和实践加工模型存在一定差距，在建立合理的网格划分和提高材料的本构模型精确度等方面仍需要改进，从而提高有限元仿真的准确性。	很难实时监测刀具的加工状态，只能通过听声音，触摸振动感受切削加工状况是否良好，无法动态了解切削过程。

### 4 结论

本文通过制定枪钻加工45号钢棒料实验，观察切削过程中切屑的形态，对切屑的形成过程进行理论研讨、仿真分析与数值模拟计算，得出以下结论：

(1) 钻削过程中产生的切屑形态包括：单元切屑、带状切屑、挤裂切屑和崩碎切屑等，切削速度较低时，主要为带状切屑，切削速度较高时，主

要为单元切屑；切削速度和进给量是影响切屑形态的两个关键要素；切削速度对切屑硬化产生影响，进而改变切屑状态，进给量则通过改变切屑厚度影响切屑形态。

(2) 45号钢硬度较高，产生的切屑易变形，在高压冷却液的作用下与枪钻、工件内壁碰撞，产生断裂。切削速度较低时，产生的带状切屑容易堵塞，出现缠刀现象，使枪钻振动，降低加工质量；较小的切屑虽易于排出，但是更易堵塞孔壁与钻杆



间隙,导致被加工孔划伤,因此,合理匹配切削参数,保证切屑顺利排出,是保证加工质量的前提。

(3)当切削速度保持不变,随着进给量的增大,切屑的主要形状从长带状向单元切屑逐渐转变。当进给量保持不变时,随着切削速度的增大,切屑尺寸从大变小再重新变大。在加工效率相同的情况下,低切削速度、高进给断屑效果往往比高切削速度、低进给的断屑效果要好。加工 $\Phi 20\text{mm}$ 的深孔时,采用切削速度 $60\sim 70\text{m/min}$ 、进给量 $0.035\sim 0.045\text{mm/r}$ 产生的排屑符合工艺要求。

(4)有限元法仿真中,可对生成切屑的形态、断屑方式、轴向力与扭矩、切削过程温度变化等进行模拟与分析,结论基本符合实验结果,能描述加工过程中许多现象与难以测量的物理量,是理论分析的有用工具。

## 致谢

本项目受到咸阳职业技术学院科研基金项目(2018KYC05)资助,项目名称“金属丝连续矫直器结构设计与三维打印技术研究”

本项目受到陕西省教育厅专项资助,项目名称“工艺知识库支持的刀具制造过程全要素工艺模型体系构建”(项目编号19JK0403)。

## 参考文献

[1]Wang Y, Yan X, Bin L I, et al. The study on the chip formation and

wear behavior for drilling forged steel S48CSIV with TiAlN-coated gun drill[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2012, 30(1):200-207.

[2]Wang Y, Jia W, Zhang J. The force system and performance of the welding carbide gun drill to cut AISI 1045 steel[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74(9-12):1431-1443.

[3]武鹏,张柱银,许宁,张佳丽,李亮.枪钻切屑变形对孔表面质量影响研究[J].工具技术,2017,51(10):58-61.

[4]胡江林,焦剑,张伟.加工银铜合金枪钻切削参数优化[J].工具技术,2012,46(03):28-31.

[5]赵丽琴,王彪,何谨恒,刘永姜.准干式深孔镗削中切屑运动的仿真分析[J].机械设计与研究,2013,29(02):84-87.

[6]胡宽辉,沈兴全,马腾,李建.BTA深孔钻削EA4T钢的屑形研究[J].工具技术,2017,51(02):49-51.

[7]苟琪,李云芳.枪钻低频振动钻孔断屑的研究[J].工具技术,1997(7):7-11.

[8]房嘉赓,苗鸿宾,沈兴全.枪钻低频轴向振动钻孔的有限元分析[J].机床与液压,2016,44(01):143-146.

[9]Guo H, Yang W, Liu L, et al. Simulation Analysis of RuT450 Drilling Force Based on LS-DYNA Gun Drilling[J]. Key Engineering Materials, 2018, 764:271-278.

[10]李琦,裴宏伟,于勇波,郭成.BTA深孔钻切削过程实验研究[J].机械设计与制造,2004(01):105-106.

[11]李健,沈兴全,王唯,胡宽辉.基于BP神经网络的深孔切屑形态预测模型[J].工具技术,2017,51(03):39-43.

[12]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(02):122-125.

[责任编辑:王军利]

# Cutting Experiment and Simulation Analysis of No.45 Steel Gun Drilling of Deep Hole

ZHANG Xiao-fen

(Department of Mechatronic Engineering (Technician), Xianyang Vocational & Technical College, Xi-xian New Distract, Shaanxi 712046)

**Abstract:** The chip shape has a great influence on the forming precision of the deep hole during the gun drilling. The chip generated by the drill tip is easy to block in the v-shaped chip discharge groove or wound on the drill bit. Reasonable chip breaking and chip removal are the premise to ensure the smooth processing. In this paper, the effect of cutting speed and feed rate on chip shape was studied by single factor experiment. In this paper, the effect of cutting speed and feed rate on chip shape was studied by single factor experiment. When cutting speed was low, it was mainly banded chip. When cutting speed is high, it is mainly unit chip. When cutting speed remains constant, the main shape of chip changes gradually from long band to unit chip with increasing feed rate. When the feed rate remains constant, the chip size becomes smaller and larger again as the cutting speed increases. Deform-3D finite element simulation method is used to simulate chip forming process and shape, chip breaking mode in deep hole machining, and the axial force and torque, cutting process temperature and other process quantities are calculated numerically to provide theoretical basis for cutting process control. Finally, the experimental results show that under the same machining efficiency, the chip cutting effect with low cutting speed and high feed is often better than that with high cutting speed and low feed.

**Key words:** deep hole processing, Gun drill, chip morphology, simulation analysis