

# 基于枪钻的 42CrMo 合金钢深孔钻削分析

李卫国, 沈兴全, 余少华, 廖科伟, 董振, 李瑞宣

中北大学; 山西省深孔加工工程技术研究中心

**摘要:** 在深孔钻削加工 42CrMo 合金钢时, 易造成切削温度高、刀具磨损快等问题, 从而影响加工质量。针对某传动轴的深孔加工, 为得到合适的切削参数、保证技术要求, 利用 DEFORM-3D 有限元分析软件设计正交仿真试验, 分析不同切削参数对切削温度和刀具磨损的影响, 得到最佳的切削用量。加工结果表明, 枪钻用此切削用量进行深孔加工可以满足技术要求, 为优化枪钻加工 42CrMo 合金钢时的切削用量、提高产品质量和降低刀具磨损提供了指导。

**关键词:** 枪钻; 42CrMo; DEFORM-3D; 切削温度; 刀具磨损

**中图分类号:** TG713; HT161

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-7008.2019.01.020

## Deep Hole Drilling of 42CrMo Alloy Steel Based on Gun Drill

Li Weiguo, Shen Xingquan, Yu Shaohua, Liao Kewei, Dong Zhen, Li Ruixuan

**Abstract:** When deep hole drilling is performed in 42CrMo alloy steel, the problems such as high cutting temperature, rapid tool wear and the like may occur, which affecting the machining quality. For deep hole machining of a drive shaft, the technical requirements are ensured to obtain suitable cutting parameters. Using DEFORM-3D finite element analysis software, an orthogonal simulation test is designed to analyze the effect of different cutting parameters on the cutting temperature and tool wear to obtain the best cutting amount. The actual processing results show that the gun drill with this cutting amount for deep hole machining can meet the technical requirements. This study provides some guidance and reference for optimizing the cutting amount of 42CrMo alloy steel used in gun drilling, improving product quality and reducing tool wear.

**Keywords:** gun drill; 42CrMo; DEFORM-3D; cutting temperature; tool wear

## 1 引言

42CrMo 高强度钢(美国牌号 4140, 德国牌号 4242CrMo4)具有高强度和高韧性, 有较高的疲劳极限和抗多次冲击能力, 适宜制造如增压器齿轮、发动机气缸、传动轴和连杆等关键零件<sup>[1]</sup>。42CrMo 合金钢属于难加工材料, 在加工时易产生高温, 刀具磨损快, 影响工件加工质量、生产效率和刀具寿命。本文针对某 42CrMo 传动轴深孔加工使用枪钻缺少切削参数问题, 研究了 42CrMo 合金钢在钻削过程中切削参数对切削温度和刀具磨损的影响, 对优化切削参数、提高加工效率、减小工人刃磨时间和增大枪钻使用寿命有重要意义。

国内外学者对 42CrMo 合金钢加工时产生的切削温度和刀具磨损问题进行了大量研究。王栋等<sup>[2]</sup>对 42CrMo 合金钢的切削模型进行仿真分析, 得出切削速度对工件表面残余应力的影响最大, 进给量次之, 切削深度最小; 梁军华等<sup>[3]</sup>进行了 42CrMo 合金钢的车削试验, 研究了切削用量对切削

力的影响; 张波等<sup>[4]</sup>通过对 42CrMo 合金钢的钻削试验, 分析了钻头刃口处理对钻削时的切削力和刀具寿命的影响; 贾永鹏等<sup>[5]</sup>用有限元软件模拟了船用柴油机机身的深孔钻削过程, 得到了温度的分布情况, 研究了切削用量对钻削温度的影响规律; 朱红霞等<sup>[6]</sup>对铝合金的深孔钻削进行了有限元模拟仿真, 得出钻削温度与刀具磨损呈一定的线性关系; Arrazola P. J. 等<sup>[7]</sup>分析了刀具的类型、涂层和可加工性对切削热场的影响。

以上研究极少涉及钻削方面, 因孔加工(尤其是深孔加工)在 42CrMo 等合金钢的应用越来越广泛, 本文运用 DEFORM-3D 有限元分析软件模拟 42CrMo 合金钢的深孔加工过程, 分析不同切削参数对切削温度和刀具磨损的影响, 得到最佳的切削参数, 并进行实际加工。

## 2 枪钻加工仿真方案

### (1) 材料模型的建立

42CrMo 合金钢内部加入的合金元素使其具有相当高的强度和韧性, 也导致该材料不易加工。42CrMo 合金钢的化学成分和物理性能分别见表

1 和表 2<sup>[8]</sup>。

表 1 42CrMo 合金钢的化学成分 (wt. %)

元素	C	Si	Mn	S	P
含量	0.38 - 0.45	0.17 - 0.37	0.50 - 0.80	≤0.035	≤0.035
元素	Cr	Ni	Cu	Mo	V
含量	0.90 - 1.20	0.03	0.03	0.17	0.01

表 2 42CrMo 合金钢的物理性能

抗拉强度 $\sigma_b$ (MPa)	屈服强度 $\sigma_s$ (MPa)	弹性模量 $E$ (GPa)		
1080	1150	210		
伸长率 (%)	断面收缩率 $\phi$ (%)	冲击功 $E_{AkV}$ (J)		
14	55	90		
硬度 (HRC)	比热容 (J/kgK)	密度 ( $g/cm^3$ )	熔点 ( $^{\circ}C$ )	
58	460	7.85	1560	

利用有限元软件对金属切削过程中的材料变化形式进行模拟,即对金属材料发生弹塑性变形时进行应力应变关系的求解。材料本构方程反映的是特定场合下材料物理特性的变化关系,采用 42CrMo 的 Johnson-Cook (J-C) 本构模型方程为<sup>[10]</sup>

$$\sigma = [595 + 580\varepsilon^{0.133}] \left[ 1 + 0.023 \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - 293}{2093 - T_0} \right)^{1.03} \right] \quad (1)$$

式中,  $\sigma$  为等效应力;  $T$  为变形温度;  $T_0$  为室内温度;  $\varepsilon$  为等效应变;  $\dot{\varepsilon}$  为等效应变速率;  $\dot{\varepsilon}_0$  为等效应变速率。

(2) 刀具磨损模型的建立

枪钻加工过程中,枪钻切削刃会产生磨损。选用适合钻削仿真的 Usui 模型作为刀具的磨损模型,方程为

$$w = \int a_p V e^{-b/T} dt \quad (2)$$

式中,  $w$  为刀具磨损值;  $p$  为接触界面压力;  $V$  为切削速度;  $T$  为切削温度;  $dt$  为时间增量;  $a$ 、 $b$  为校准系数。参照已有的研究成果,将  $a$  设为 0.0000001、 $b$  设为 855<sup>[10]</sup>。

(3) 钻削仿真模型的简化

由于枪钻刀具有着复杂的刃磨角度,考虑到仿真软件和计算机硬件的限制,需要对刀具和工件进行简化。将传动轴简化为直径 40mm、厚度 10mm 的圆柱体,保留枪钻主要刀具角度,选择 UG 软件对枪钻和工件进行建模,然后生成 .stl 格式导入 DEFORM-3D 中。简化的枪钻刀具角度见图 1。

### 3 正交仿真试验设计

#### 3.1 仿真参数确定

根据 Sandvik 公司推荐的通用合金钢枪钻切削用量,选用  $\phi 18$  枪钻钻削合金钢,切削速度  $v$  的大致范围为 40 - 120m/min,进给量  $f$  为 0.02 - 0.1mm/

r,所设计的正交试验参数见表 3。

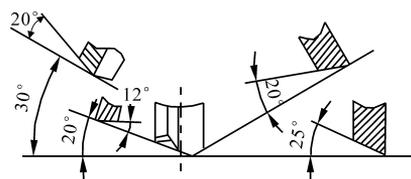


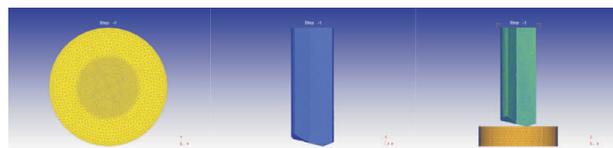
图 1 简化的枪钻刀具角度

表 3 正交仿真试验参数

序号	切削速度 $v$ (m/min)	进给量 $f$ (mm/r)	切削深度 $a_p$ (mm)
1	70	0.02	5
2	70	0.045	5
3	70	0.07	5
4	70	0.095	5
5	80	0.02	5
6	80	0.045	5
7	80	0.07	5
8	80	0.095	5
9	90	0.02	5
10	90	0.045	5
11	90	0.07	5
12	90	0.095	5
13	100	0.02	5
14	100	0.045	5
15	100	0.07	5
16	100	0.095	5

#### 3.2 钻削仿真参数设定及网格划分

选择钻削加工类型,单位为 SI,设置环境温度为 20 $^{\circ}C$ ,设置接触面摩擦因子为 0.6,设置传热系数为 45N/sec/mm/C。选择工件为 plastic,材料 42CrMo 为 AISI - 4140,选择枪钻为 rigid,材料为硬质合金 WC。使用相对网格划分,工件的网格划分总数为 80000 个。由于钻削部分集中在工件中心直径为 18 的区域范围内,为得到较为准确的结果,在该区域内以 0.01 的比例对工件网格进行重划分,将枪钻的网格数量划分为 100000 个<sup>[12]</sup>。网格划分好的工件和枪钻模型及钻削有限元模型见图 2。



(a) 工件网格划分 (b) 枪钻网格划分 (c) 枪钻加工模型

图 2 网格划分情况及枪钻加工有限元模型

#### 3.3 边界条件的确定

仿真的总步数设为 2000 步,仿真每进行 25 步软件自动保存数据。将钻削深度设为 5mm,工件固定不动,设置工件外圆在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向上的速度为 0,工件的上下表面设为热交换面。枪钻在钻削仿真过程中保持绕  $z$  轴旋转的同时沿  $-z$  轴作进给

运动,因此按照表1进行参数设置,将枪钻的所有表面设为热交换面。

#### 4 仿真结果的处理分析

利用软件的后处理模块可得到钻削仿真切屑产生过程的温度场云图(见图3),钻削仿真过程中产生的切屑断裂现象见图4。温度最高处为工件和枪钻接触部位,切屑温度极高,随着与钻头的接触距离变远而降低。

在钻削过程中,切削热主要由工件材料的塑性变形和切屑与枪钻钻头的摩擦引起,而大量热量被切屑带走,所以枪钻钻头的温度低于工件和切屑,其温度场云图见图5。枪钻钻头的最高温度出现在内外刃交界处和前刀面位置,切削刃是产生切削的部位,切削热伴随着工件的塑性变形和枪钻钻头的摩擦不断产生。钻削过程中,切屑与枪钻前刀面产生摩擦,造成该位置也会产生热量。由于切削热、切削力和摩擦力的共同作用,枪钻磨损主要发生在枪钻钻尖和内外刃的位置(见图6)。

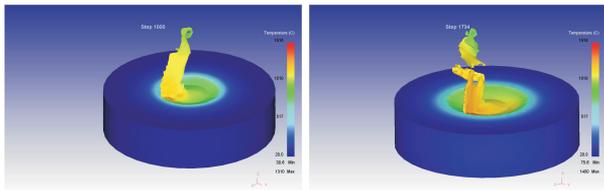


图3 切屑产生过程的温度场云图 图4 切屑的断裂现象

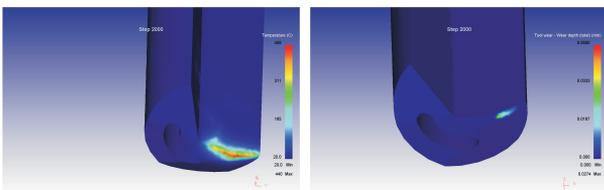


图5 枪钻的温度场云图 图6 枪钻的磨损量云图

##### 4.1 切削速度对切削温度和刀具磨损量的影响

选取仿真试验组数3、7、11和15,在一定进给量 $f(0.07\text{mm/r})$ 情况下,分析不同切削速度 $v(70\text{m/min}$ 、 $80\text{m/min}$ 、 $90\text{m/min}$ 和 $100\text{m/min})$ 对切削温度和刀具磨损量的影响。在后处理模块得到枪钻温度场云图和刀具的磨损量云图,从中可看出枪钻切削时的切削温度和磨损量。对仿真结果进行数据统计分析,可得到对应的切削温度变化曲线图和磨损量变化曲线图(见图7和图8)。

从图7可以看出,切削温度随切削速度的增加而增加;在钻削的初始阶段,切削温度急剧增加,增加到一定程度时趋势减缓,并稳定在一定范围内;切

削速度的改变对切削温度的影响较大,符合实际生产情况。从图8可以看出,随着钻削的进行,刀具磨损量越来越大;刀具磨损量与切削速度成正比,切削速度越大,变化趋势越明显。

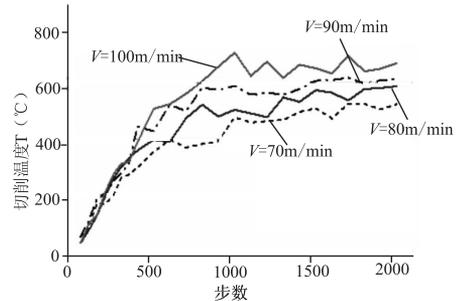


图7 不同切削速度的切削温度变化曲线

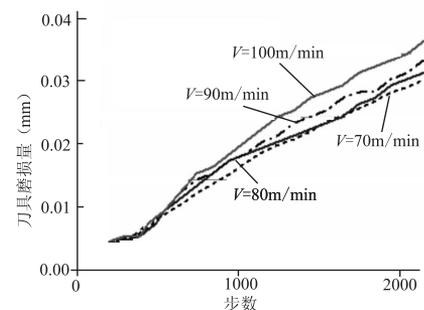


图8 不同切削速度的刀具磨损量变化曲线

##### 4.2 进给量对切削温度和刀具磨损量的影响

选取仿真试验组数9、10、11和12,在一定切削速度 $v(90\text{m/min})$ 情况下,分析不同进给量 $f(0.02\text{mm/r}$ 、 $0.045\text{mm/r}$ 、 $0.07\text{mm/r}$ 和 $0.095\text{mm/r})$ 对切削温度和刀具磨损量的影响。切削温度和刀具磨损量变化曲线见图9和图10。

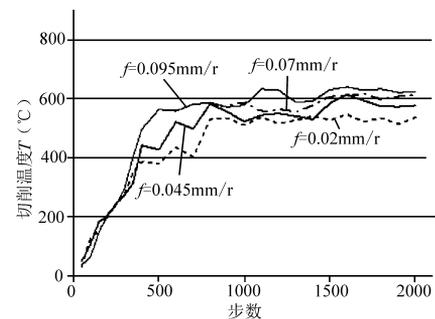


图9 不同进给量的切削温度变化曲线

从图9可以看出,切削温度随进给量的增加而增加;切削温度在钻削过程中呈不断增加的趋势,到一定程度稳定在一定范围;进给量的改变对切削温度的影响不如切削速度明显,与实际相符。

从图10可以看出,随着钻削的进行,刀具磨损量越来越大;刀具磨损量与进给量成正比,进给量越大刀具磨损升高趋势越明显;进给量的改变对刀具

磨损量的影响比切削速度明显。

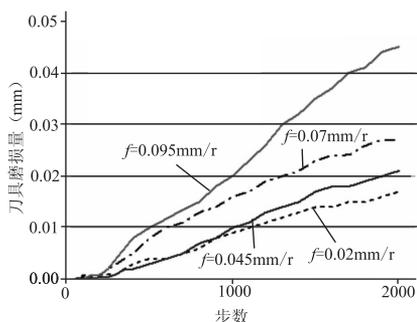


图 10 不同进给量的刀具磨损量变化曲线

## 5 试验加工实例

某 42CrMo 合金钢传动轴  $\phi 18 \times 980\text{mm}$  的深孔内表面粗糙度要求  $R_a 1.6\mu\text{m}$ , 最大直线度误差不高于  $0.5\text{mm}$ 。从以上分析可知, 增大切削速度和进给量虽能提高加工效率, 但产生的切削温度更高, 刀具磨损更为剧烈, 增加了工人的刃磨时间和刀具成本; 采用较小的切削速度和进给量会使效率太低。综合考虑切削速度和进给量对切削温度和刀具磨损量的影响, 对该 42CrMo 传动轴  $\phi 18 \times 980\text{mm}$  的深孔加工时, 切削参数应初选为  $v = 90\text{m}/\text{min}$   $f = 0.07\text{mm}/\text{r}$ 。

选用精准 DH-1300 枪钻机床和 TBT09 标准硬质合金枪钻进行钻孔加工。采用该切削参数加工完成后经测量, 孔的表面精度和直线度等满足技术要求, 枪钻磨损在正常范围内, 未出现崩刃现象。技术参数测量值见表 4。

表 4 技术参数测量值

编号	粗糙度 $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	直线度误差 (mm)
1	1.26	0.34
2	1.34	0.38
3	1.32	0.40

## 6 结语

建立 42CrMo 合金钢的材料模型和磨损模型, 运用 DEFORM-3D 软件建立某传动轴的枪钻深孔加工有限元模型, 分析了切削速度和进给量对切削温度和刀具磨损量的影响规律。

(1) 切削温度与切削速度成正比, 随着钻削的进行, 切削温度越来越大, 最后趋于平稳; 切削温度与进给量正相关, 在钻削过程中切削温度呈不断增加的趋势, 最后稳定在一定的范围; 进给量的改变对切削温度的影响不如切削速度明显。

(2) 刀具磨损量与切削速度成正比, 切削速度

越大, 刀具磨损变化趋势越明显; 刀具磨损量与进给量成正比, 进给量越大, 刀具磨损升高趋势越明显; 进给量的改变对刀具磨损量的影响比切削速度更明显。

综合考虑各种因素, 得出了最佳的切削参数。采用此参数进行传动轴的枪钻深孔加工, 测量  $\phi 18$  的深孔可知, 能满足表面粗糙度和直线度等技术要求, 且枪钻磨损在正常范围内。

## 参考文献

- [1] 李春胜, 黄德彬. 金属材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 252-253.
- [2] 王栋, 林强, 赵晶晶, 等. 42CrMo4 钢切削表面残余应力研究[J]. 机械设计与制造, 2014(7): 106-108.
- [3] 梁军华, 高宏力, 李登万, 等. 涂层硬质合金刀具车削 42CrMo 钢切削力试验研究[J]. 机床与液压, 2016, 44(16): 52-54, 100.
- [4] 张波, 张伟, 赵耀. 钻头刃口处理对钻削加工 42CrMo 的影响[J]. 工具技术, 2009, 43(2): 36-38.
- [5] 贾永鹏, 景旭文, 刘传君, 等. 基于 Deform-3D 的船用柴油机机身深孔加工仿真研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014(12): 141-144.
- [6] 朱红霞, 沈兴全, 张利新. 准干式深孔钻削中温度场与刀具磨损的仿真研究[J]. 机械设计与制造, 2014(2): 193-195.
- [7] Arrazola P J, Arriola I, Davies M A. Analysis of the influence of tool type, coatings, and machinability on the thermal fields in orthogonal machining of AISI 4140 steels[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2009, 58(1): 85-88.
- [8] 景旭文, 王楚辉, 周宏根, 等. 基于 Deform-3D 的 42CrMo 钢铣削仿真分析[J]. 工具技术, 2018, 52(2): 71-75.
- [9] Agmell M, Ahadi A, Ståhl J E. The link between plasticity parameters and process parameters in orthogonal cutting [J]. 14th Cirp Conference on Modeling of Machining Operations, 2013(8): 224-229.
- [10] 李道波, 王彪, 刘永姜, 等. 基于 Deform-3D 的准干式深孔钻削有限元分析[J]. 现代制造工程, 2013(1): 79-83.
- [11] 贾永鹏. 船用柴油机关键零件深孔加工机理及切削参数优化技术研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2014.

第一作者: 李卫国, 硕士研究生, 中北大学机械工程学院, 030051 太原市

First Author: Li Weiguo, Postgraduate, College of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China