

基于 Fluent 冷却排屑应用的深孔枪钻优化设计

高琳^{1,2}, 沈兴全^{1,2}, 陈振亚², 刘晓鹏¹, 王丽鹏²

¹中北大学;²山西省深孔加工工程技术研究中心

摘要: 枪钻前端面的几何角度影响过油孔里切削液的流动方向及压力分布,不合理的磨削面将加剧刀具磨损和降低加工质量。本文分析了冷却剂的流动特性,通过改变枪钻前端面的刃磨角度进一步优化过油孔的位置,并用 Fluent 软件仿真进行了分析对比,定性了解枪钻前端面的几何位置对排屑流场的影响,得出最优的几何位置。经试验,加工效果良好。

关键词: 深孔枪钻;过油孔;切削液;流场仿真

中图分类号: TG523;TH162;TP391.9

文献标志码: A

Optimal Design of Deep Hole Gun Drill Based on Fluent Cooling Chip Removal

Gao Lin, Shen Xingquan, Chen Zhenya, Liu Xiaopeng, Wang Lipeng

Abstract: The geometric angle of the front face of the gun drill directly affects the flow direction and pressure distribution of the cutting fluid in the oil hole, and the unreasonable grinding surface will aggravate the tool wear and reduce the processing quality. Followed by changing the gun drill on the front end face of the grinding angle, the coolant flow characteristics are analyzed. To further optimize the oil hole position, the geometric effect of qualitative understanding of the front end of the gun drill cuttings flow are analyzed by Fluent software simulation. The optimal geometric position is obtained, and the experimental machining is carried out and good machining results are obtained.

Keywords: deep hole gun drilling; oil hole; cutting fluid; flow field simulation

1 引言

枪钻是外排屑深孔钻的代表,主要由钻头和钻杆组成,其工作原理如图 1 所示。工作时高压切削液由钻杆后端的中心孔注入,经钻头的进油孔到达切削区,迫使切削液由 V 形槽和孔壁间的空隙排除。因切屑从深孔钻的外部排出,故称外排屑。目前枪钻可加工直径为 1.5 - 38mm 的小深孔,长径比超过 100,最大可至 250mm 的深孔^[1]。

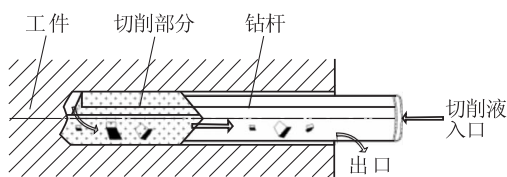


图 1 枪钻工作原理

排屑效果直接影响钻头的磨损率、失效模式和寿命。不能有效排出切屑会抑制切削刃的冷却,降低刀具的切削性能。同时,如果发生堵屑现象,会使刀具扭转载荷增加,从而造成钻头严重磨损或断裂。G. L. Tnay 等^[2]开发了一种能够测量孔底冷却剂压

力的装置,结果发现钻头前端面的几何形状严重影响钻孔周围的压力分布。K. S. Woon 等^[3]针对具有单孔、双孔和月牙形过油孔的枪钻系统进行了切削液的压力仿真分析。结果表明,采用两孔枪钻系统进行加工过程时的切削液压力损失最小,并能对切削提供最好的加工性能。

目前文献中关于过油孔的位置并无确切的研究,枪钻端面刃磨角度不同直接影响过油孔里切削液的流动方向及其周围压力分布,不合理的磨削面会直接影响切削液的润滑和排屑性能。本文通过计算流体动力学(CFD)模型,研究在采用不同磨削角的枪钻进行加工过程中切削液流经油孔时的压力情况。目的是通过 CFD 模拟提高切屑的疏散效率,通过钻面几何优化定性了解过油孔几何位置对排屑流场的影响。

2 流体数学模型

由于枪钻切削液润滑油流过的路径是圆形,枪钻系统流场内的切削液为连续性流体,因此流畅内的切削液可以认为是定常的不可压缩流体。在加工过程中,由于流场中的流道布满了极压润滑油,因而没有自由面,表面张力的作用忽略不计。质量守恒定律、能量守恒定律和动量守恒定律是计算流体力

基金项目: 山西省先进制造技术重点实验室开放基金(XJZZ201602);山西省归国留学人员项目(2015-077);中北大学基金(XJJ2016005);山西省重点研发基金(201603D121008)

收稿日期: 2017年5月

学必须满足的三大基本定律,而流场中控制流体方程除了以上定律还有湍动能方程^[4]。

质量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \bar{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \bar{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \bar{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \\ \nabla = \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z} \end{cases} \quad (2)$$

湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,湍动能方程为

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (3)$$

耗散率方程为

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中, G_k 为平均速度梯度引起的湍动能; G_b 为浮力影响引起的湍动能; Y_M 表示可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率的影响; 湍流粘性系数 $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$; 在 Fluent 中, 常数项系数为系统默认值^[5]。

3 枪钻的设计与仿真

3.1 钻头过油孔的设计

枪钻钻头前端几何形状决定了枪钻的切削力学和加工性能。枪钻切削刃主要由外刃、内刃和钻尖组成。不同的外形设计是根据其在外边角 ϕ_0 、内边角 ϕ_1 和钻顶点偏移 e 进行分类。最常见的设计是 N4 ($\phi_0 = 20^\circ, \phi_1 = 15^\circ, e = D/4$); N8 ($\phi_0 = 30^\circ, \phi_1 = 20^\circ, e = D/4$) 和 N13 ($\phi_0 = 40^\circ, \phi_1 = 5^\circ, e = D/4$)。由于加工材料是 TC4 难加工合金, 根据其密度小、比强度高、耐高温和抗氧化性能好等特点选择 N4 ($\phi_0 = 20^\circ, \phi_1 = 15^\circ, e = D/4$) 这种外形。钻头设计对冷却液的流变性能和排屑降温效率有重大影响。

为了更好地排屑散热, 通过改变刃磨角度来优化过油孔位置, 文献[3]采用具有两孔的枪钻系统进行加工过程中其切削液的压力损失最小, 并能为钻削提供最好的加工性能。两孔式的过油孔枪钻钻头前端面的结构见图 2, 切削刃主要由外切削刃(外刃)、钻尖和内切削刃(内刃)组成, 端面主要由外刃第一后角面、外刃第二后角面、刀尖后角面、内刃后角面和过油面五个面组成。

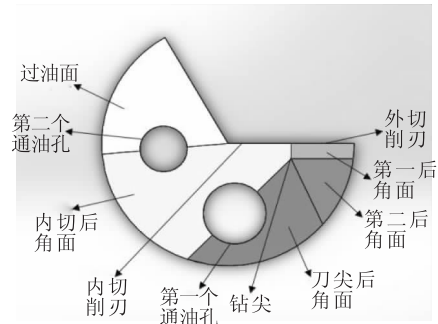


图 2 枪钻前端面结构

当枪钻切削刃或刀面磨损时, 需要在万能刀具磨床或专用刃磨机床上针对钻头端面进行刃磨。通过改变刃磨刀尖后角面的度数来改变过油孔的位置, 达到更好的排屑、降温和润滑效果。为了使改变切削角度后两过油孔流量的变化效果更明显, 采用改变两孔的位置距离来代替切削角度变化而引起的流量变化。

如图 3 所示, 传统的两孔设计中, 左侧较小的过油孔主要起带走切屑的功能, 所以在刃磨时只要不发生干涉, 并没有过多的规定。为了能让切削液更好地带走切屑, 现将第二个过油孔的位置设计为过油面和内刃后角面的交线通过过油孔的中心; 右侧较大的第一个过油孔主要是降低刀面切削温度并带走切屑, 为更好地降温、排屑和降低刀具磨损, 对内刃后角面和刀尖后角面相交处的过油孔进行改进。传统的通油只是在两面相交处, 可能偏左或偏右(见图 3a 和图 3b), 没有确切的几何位置关系; 现将孔的位置设计为交线过孔的中心(见图 3c), 以更好地达到降温排屑的作用, 并对钻头的流体域的压力和速度进行建模仿真。

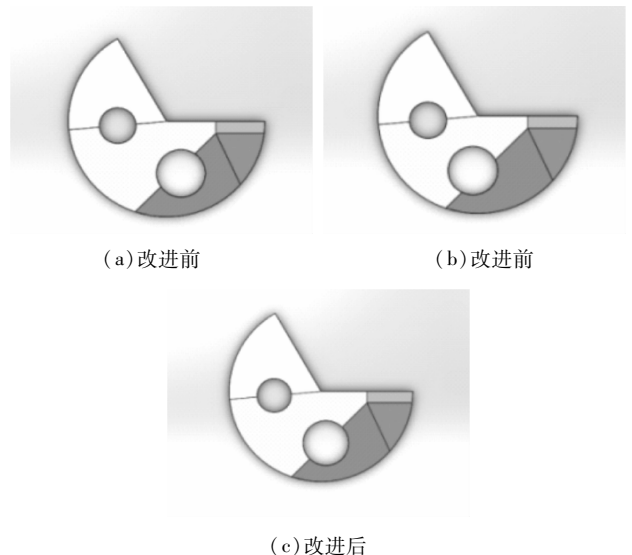
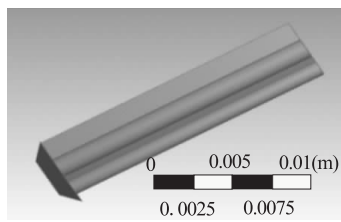


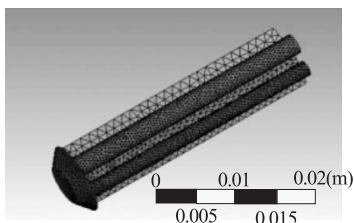
图 3 改进前后的过油孔

3.2 流场模型

ANSYS Workbench 里的 Fluent 模块主要包括前处理、求解器和后处理。本次研究的是枪钻系统的流场分布情况。由于枪钻前端面结构复杂,切削液流道切削区的流场形状不规则,而且结构复杂,因此需要对枪钻前端面的部分流场进行简化^[6]。通过 SolidWorks 软件建立改进后枪钻冷却系统的油路流道模型,保存为 .x-t 文件格式并导入 Fluent 里的 geometry 进行处理,也可以在 geometry 里直接建模。改进后过油孔的流场建模(见图4)。



(a) 流体域



(b) 网格划分

图4 改进后过油孔位置的流体域及网格划分

当确定 Fluent 进行计算的几何区域后,就要把这个区域进行离散化,也就是对它进行网格划分。由于简化了钻头流场模型,图形较规则,所以采用自动化划分网格模式进行划分,对两个过油孔、V形排屑口及钻头前端分别进行不同的膨胀参数的设置,总共划分 60804 网格、19614 节点。

3.3 边界条件设定

在不考虑有切屑的情况下,研究切削区域内的切削液受力情况,建立与实际情况相近的数学模型。采用水基切削液,黏度及密度分别为 $\mu = 4.08 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、 $\rho = 0.89 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ ^[10];根据试验数据计算得出深孔钻削过程油路系统的流动属于湍流状态。计算中对控制方程和边界条件采用有限元法进行离散,采用 SIMPLE 算法求压力—速度耦合,动量、湍流动能和湍流耗散率的离散格式均采用二阶迎风差分格式^[6]。

切削液入口设置为压力入口边界,大小为 1.5 m/s ;第一个入口处设置湍流强度为 5%,水力直径为 0.004 m ;第二个入口处的湍流强度为 5%,水力直径为 0.003 m ;出口边界为自然流出,出口处压

力为 1 个标准大气压。

3.4 仿真结果与分析

图5为总的压力云图。由图可知,在切削液进入切削区前,在钻头的前端面及与工件接触的切削区能量损失严重^[7,8]。过油孔内的压力已从 6.3 MPa 降到 2.6 MPa 左右,压力损失将近一半,余下的压力用于刀面降温并将切屑带入 V 形排屑槽内排出。仿真显示的云图和生产中的经验值相同。因此,要解决降低刀面温度减轻磨损的问题,主要是解决切削区液体中的压力问题。

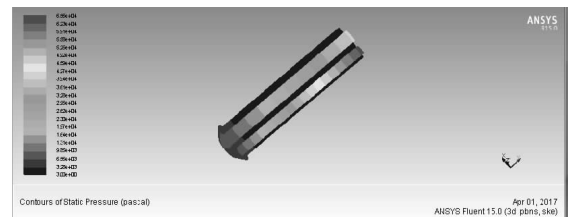
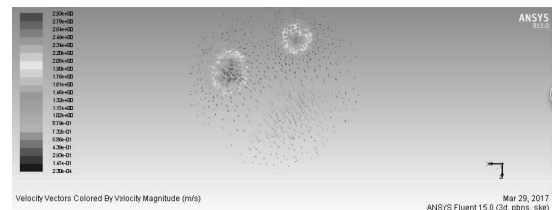
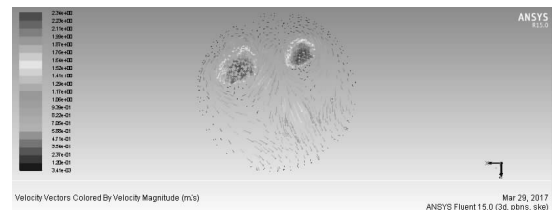


图5 总的压力云图

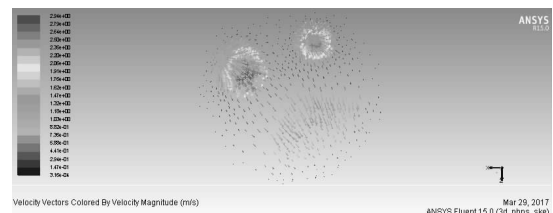
图6分别为 a 钻面、b 钻面和 c 钻面的速度矢量图。由图6a可知,过油孔的速度 80% 保持在 2 m/s 以上,V形槽的速度可达 1.3 m/s 。由于两孔的位置距离较远,能量较分散,不能将切屑聚集起来导入 V 形排屑槽。



(a) a 钻面



(b) b 钻面



(c) c 钻面

图6 钻面的速度矢量图

由图6b可知,过油孔的速度集中在 2.3 m/s ,V形槽的速度保持在 1.5 m/s 。b 钻面的速度可观,但

由于两个过油孔的位置较近,易形成涡流,影响孔直线度。大部分流量流向内刃后角面和过油面,外刃及后角面不能起到很好的润滑降温作用,严重时将导致整体的切削性能恶化,急剧增加的扭转载荷会造成钻头严重磨损断裂。

图 6c 为改进后的 c 钻面的矢量图。由图可知,过油孔的速度 60% 保持在 2.3m/s 以上, V 形槽的速度到 1.6m/s。改进后的两过油孔处的速度和 V 形槽速度损失较少。由于两过油孔的直径距离刚好过各个面交线,不仅外切削刃、第一后角面和第二后角面得到很好的润滑降温,而且不易出现涡流影响加工过程及加工质量,同时又能保证切屑顺利排出。

由上述对比分析可知:两个过油孔的位置如果偏离较远,不能很好地将切屑带走和排出;如果位置距离较近,易产生涡流影响加工质量;只有当两过油孔的位置设计在交线处并通过过油孔的中心时,能很好地降低整个钻面的切削温度,并带走切屑。

4 试验研究与结果

枪钻前端面磨削角度不合理易造成刀面磨损,枪钻磨损后,刃磨时必须在万能刀具磨床或专用刃磨机床上将枪钻装在专用夹具上,选用粒度 120 左右的树脂金刚石砂轮进行刃磨。每次刃磨只修磨内外刃的后角面,钻尖偏移量 $D/4$,具体加工角度见表 1,也可根据所加工材料适当更改角度,以保证合理的几何角度和刃尖位置。

表 1 枪钻前端面磨削角度 (°)

切削面	水平角度	垂直角度
第一后角面	+15	+20
第二后角面	+20	+19.5
刀尖后角面	+25	0
内刃后角面	+15	-15
过油面	-14	-18



图 7 改进后枪钻前端磨削面

根据上述研究,对枪钻前端面采用表 1 中的刃磨角度进行刃磨,重新刃磨后钻头的前端面如图 7 所示,即保证刀尖后角面和内刃后角面的交线过第一个过油孔的中心,内刃后角面和过油面的交线过

第二个过油孔的中心。使用改进刃磨角度后的枪钻(见图 7)对 TC4 钛合金进行加工。试验结果表明,改进后的钻面磨损程度显著减少并且排屑效果得到显著改善。

5 结语

枪钻前端面的几何角度直接影响过油孔中切削液的流动方向及周围的压力分布。改变刃磨角度,优化过油孔的位置,即刀尖后角面与内刃后角面的交线通过第一个过油孔的中心,内刃后角面与过油面的交线过第二个过油孔的中心。通过仿真对比分析过油孔优化前后切削液流体场的分布情况,得出改进过油孔位置后,切削液速度和压力得到明显提升,并不易出现涡流,能量损失较小。试验表明,优化过油孔的位置改善了枪钻加工系统的排屑性能,减少了刀具磨损,同时提高了加工质量。

参考文献

- [1]武文革,辛志杰,成云平,等.金属切削原理及刀具[M].北京:国防工业出版社,2009.
- [2]G L Tnay,S Wan,K S Woo,et al. The effects of dub-off angle on chip evacuation in single-lip deep hole gun drilling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2017,113:10-18.
- [3]K S Woon,G L Tnay,M Rahman,et al. A computational fluid dynamics (CFD) model for effective coolant application in deep hole gundrilling[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture,2016,108:66-73.
- [4]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.
- [5]张惠,康士廷. Fluent 14 流场分析自学手册[M].北京:人民邮电出版社,2014.
- [6]石世发.基于 Fluent 的准干式深孔加工系统结构的研究[D].太原:中北大学,2012.
- [7]李文亮,王爱玲,刘兆华,等.深孔钻削中油路系统静态特性分析[J].现代制造工程,2009,(01):67-69.
- [8]李文亮.深孔加工 DF 系统排屑机理研究及建模与仿真[D].太原:中北大学,2009.

第一作者:高琳,硕士研究生,中北大学机械与动力工程学院,山西省深孔加工工程技术研究中心,030051 太原市

First Author: Gao Lin, Postgraduate, School of Mechanical and Power Engineering, North University of China, Research Center of Deep Hole Processing Engineering Technology, Taiyuan 030051, China