

液力对深孔加工刀具及工具的稳定作用

于大国^{1,2}, 王志伟^{1,2}, 李瑞宣^{1,2}, 任丽娟^{1,2}

¹中北大学; ²山西省深孔加工工程技术研究中心

摘要: 针对深孔刀具长径比大、刚性差、易偏斜、弯曲和振动的问题, 提出利用切削液的作用稳定深孔加工刀具和工具。切削液流过钻杆、顺锥、钻头和冷却切削部位后带着铁屑从钻头、顺锥和钻杆的内孔流出。顺锥与已加工深孔孔壁构成环状间隙, 切削液流过顺锥时, 从大间隙流向小间隙, 当顺锥及与其固定连接的深孔刀具系统出现偏心时, 切削液推动顺锥, 消除或减小刀具系统的偏心距。通过探讨螺旋槽结构对稳定深孔电火花加工电极的作用可知, 在电极外圆表面加工多条螺旋浅槽, 使液体快速绕电极外表面旋转产生陀螺作用, 可以提高电极稳定性和抗干扰能力, 防止走偏; 液力对深孔加工刀具和工具有稳定效果。

关键词: 深孔刀具; 顺锥; 电极; 螺旋槽; 切削液

中图分类号: TG713; TH161

文献标志码: A

Stabilizing Effect of Hydraulic Force on Tool of Deep-hole Drilling

Yu Daguo, Wang Zhiwei, Li Ruixuan, Ren Lijuan

Abstract: In view of the large depth to diameter ratios of deep hole cutting tool, poor rigidity, deflection, bending and vibration, using the effect of cutting fluid to stabilize the tool of deep hole machining are put forward. The cutting fluid flows through the drill pipe, the cone, the drill bit, the cutting part, and flows out from the inner hole with chips. The cutting fluid flows through the tapered hole from the large gap to the small one, when eccentricity occurs in the cone and the deep-hole drilling system, the cutting fluid pushes the cone to eliminate or reduce the eccentricity of the cutter system. The effect of spiral groove structure on stabilizing deep hole EDM (Electric Discharge Machining) electrode is discussed. Several helical shallow grooves are machined on the outer surface of the electrode, which makes the liquid rotate rapidly around the outer surface of the electrode and produced gyroscopic effect to improve the ability of anti-interference and prevent deviation. The research shows that the hydraulic force can stabilize the tool of deep hole machining.

Keywords: deep hole tool; cone; EDM (Electric Discharge Machining); spiral groove; cutting fluid

1 引言

枪炮武器装备、液压设备、机床行业对深孔加工技术有直接或迫切需求^[1-3]。深孔加工过程中, 刀具多为细长杆, 长径比大且刚性差, 随着加工长度的

基金项目: 国家自然科学基金(51175482, 51875532); 山西省应用基础研究项目(201701D121081)

收稿日期: 2018年2月

[8] Lu Y, Takeuchi Y, Takahashi I, et al. An integrated system development for ball end mill design, creation and evaluation [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, 25(7-8): 628-646.

[9] Kim J H, Park J W, Ko T J. End mill design and machining via cutting simulation [J]. *Computer - Aided Design*, 2008, 40(3): 324-333.

[10] Abele E, Fajara M. Simulation - based twist drill design and geometry optimization [J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2010, 59(1): 145-150.

[11] Karpuschewski B, Jandacka K, Mourek D. Automatic search for wheel position in flute grinding of cutting tools [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2011, 60(1): 347-350.

[12] Li G. A new algorithm to solve the grinding wheel profile for end mill groove machining [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016: 1-10.

[13] 李铸宇, 张伟, 贺凤宝, 等. 麻花钻螺旋槽数控加工中砂轮位置的自动搜索 [J]. *大连工业大学学报*, 2014(4): 305-308.

[14] Patrikalakis N M, Maekawa T. Shape interrogation for computer aided design and manufacturing [M]. New York: Springer, 2002.

第一作者: 李铸宇, 讲师, 大连工业大学机械工程与自动化学院, 116034 辽宁省大连市

First Author: Li Zhuyun, Lecturer, School of Mechanical Engineering and Automation, Dalian Polytechnic University, Dalian, Liaoning 116034, China

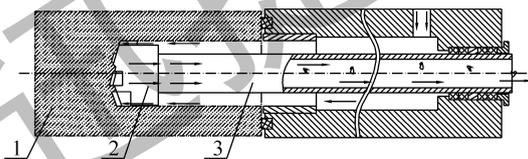
增加, 钻杆易发生振动、偏斜和弯曲变形现象, 对深孔直线度有重大影响^[4-6], 还会影响被加工孔的表面粗糙度、圆度和尺寸精度等其它质量指标。深孔加工是一种封闭、半封闭式的加工方式, 刀具的切削状况只能凭经验判定, 一般通过观察切屑形态、排屑状况等做出估计, 而加工过程中刀具的偏斜量、深孔直线度误差很难检测与纠正。

近年来, 电火花技术和激光技术被用于深孔加工, 并取得了多方面成果^[7]。稳定深孔刀具、电火花电极等工具, 防止其偏离正确的位置, 对于保证深孔直线度及其它技术指标具有非常重要的作用^[8]。随着新型高强度、高硬度、高脆性、难加工材料不断涌现, 对深孔加工的精度、效率都提出了更高的要求。因此, 稳定深孔刀具、电极成为一个非常重要的课题。

2 顺锥结构对稳定深孔刀具的作用

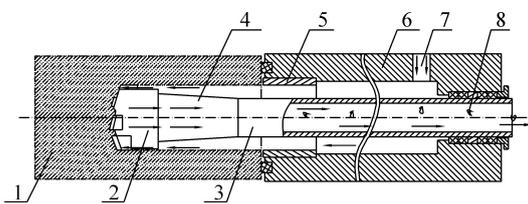
(1) 顺锥结构

现有深孔加工系统如图 1 所示。为了控制深孔直线度, 防止刀具走偏, 主要介绍应用于深孔加工刀具系统的顺锥。如图 2 所示, 切削液从进油口流入, 流过钻杆、顺锥、钻头, 冷却切削部位后带着铁屑从钻头、顺锥、钻杆的内孔流出, 回到油箱^[9]。顺锥与已加工深孔孔壁构成环状间隙, 由于切削液流过顺锥时, 从大的间隙流向小的间隙, 因此称其为顺锥。顺锥可以单独制造, 钻削深孔前将其一端与现有钻头固连, 另外一端与现有钻杆固连。



1. 工件 2. 钻头 3. 钻杆

图 1 现有深孔加工刀具系统



1. 工件 2. 钻头 3. 钻杆 4. 顺锥

5. 导向套 6. 输油器 7. 进油口

图 2 带顺锥的深孔加工刀具系统

(2) 顺锥部位切削液流量

图 3 中的圆锥体位于圆柱孔内, 两者同轴, 存在环形间隙, 圆锥体在深孔加工中随刀具缓慢进给。

液体流过圆锥体与孔壁之间的流量为^[9-11]

$$Q = \frac{\pi d \Delta p (\delta_1 \delta_2)^2}{6 \mu l (\delta_1 + \delta_2)} \quad (1)$$

式中, d 为孔的直径; δ_1 为左侧间隙高度; δ_2 为右侧间隙高度; Δp 为圆锥体两端压力差; L 为锥体的长度。

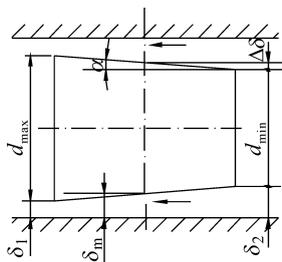


图 3 油液流过同轴圆锥环状间隙

(3) 顺锥自纠偏原理

图 4 所示的顺锥与孔不同轴, 存在偏心距 e 。

可证: 油液将自动产生作用力, 推动顺锥, 使其与孔同轴, 减小或消除偏心距 e 。若图 4 中的锥体为“倒锥”, 则可证明: 油液将自动产生作用力, 推动“倒锥”, 加大偏心距 e , 直至“倒锥”与孔壁接触, 产生卡紧现象。

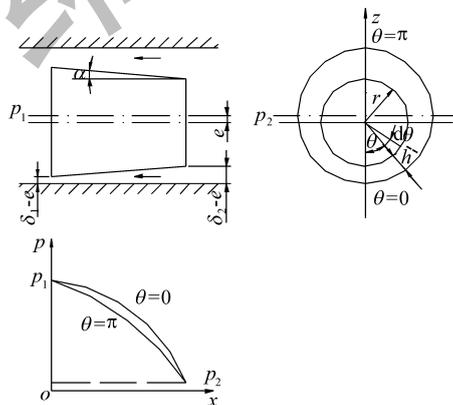


图 4 油液流过偏心圆锥环状间隙

利用顺锥的这一特点, 将其应用于深孔加工刀具系统。在钻头和钻杆之间固定一个顺锥 (见图 2), 当刀具系统因为外界干扰产生偏心时, 液体自动推动顺锥及刀具系统, 减小或消除偏心距 e , 使其与深孔同轴, 防止深孔直线度超出公差。再定义为

$$df = prd\theta dx \quad (2)$$

式中, df 为油液对微元“ dA ”的径向作用力。力的方向垂直于轴线, 从圆锥中心指向 $d\theta$ 的中间, 由于 $d\theta$ 很小, 在计算作用力时以曲面面积近似代替平面面积。

对式(2)积分可得, $f = \int df = \int prd\theta dx$ 。

可以证明^[9-11]

$$f = \frac{Lrd\theta}{2} \left[(p_1 + p_2) + (p_1 - p_2) \left| \frac{\Delta h}{h_m} \right| \right] \quad (3)$$

$$\frac{h_1 + h_2}{2} = h_m \quad (4)$$

$$\frac{h_2 - h_1}{2} = \Delta h \quad (5)$$

式(3)中的 $d\theta$ 为对应于 $\theta = 0$ 或 $\theta = \pi$ 的微小角度变量。由式(3)可以计算出对应 $\theta = 0$ 或 $\theta = \pi$ 的 f 值, 分别记为 $f_{\theta=0}$ 、 $f_{\theta=\pi}$ 。可以证明, 当 $d\theta$ 相同时, 有^[9-11]

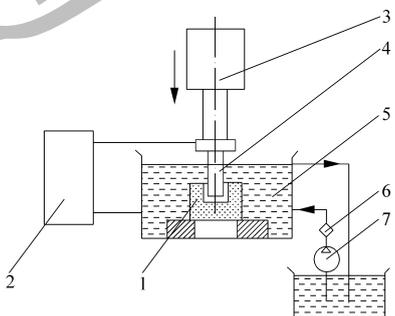
$$f_{\theta=0} > f_{\theta=\pi}$$

由上式可知, 油液在 0° 对应的作用力大于 180° 对应的作用力, 因此, 将产生一个径向力, 推动顺锥, 消除或减小其偏心距 e , 使顺锥与深孔趋于同轴。顺锥固定于钻头与钻杆之间, 将带动刀具系统与已加工深孔同轴, 防止深孔直线度超出公差^[11]。

3 螺旋槽结构对稳定深孔电火花加工电极的作用

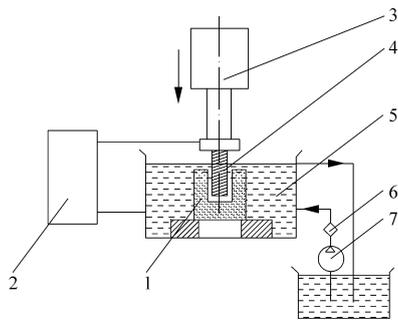
当深孔的直径很小时, 如采用钻头钻削, 钻头的刚度很低。在钻头刚接触到工件时钻头就会发生弯曲变形, 难以保证深孔的加工质量。因此, 对于小、微直径深孔可采用电火花方法加工(见图 5)。电火花加工时, 电极与工件不直接接触, 在两者之间存在间隙, 间隙足够小时, 产生火花, 利用高温使工件材料被电蚀去除。从理论上讲, 电火花加工时电极与工件不存在机械作用力, 所以电极弯曲形变小, 利于保证深孔加工质量。

当小、微孔深度较大时, 电火花方法所加工出的深孔容易偏斜。为了防止小、微深孔在电火花加工过程中出现偏斜, 本文介绍多头螺旋槽电极, 尝试采用螺旋槽电极防止电极走偏并提高排除电蚀产物(见图 6)。



1. 工件 2. 脉冲电源 3. 主轴 4. 电极
5. 工作液 6. 过滤器 7. 泵

图 5 电火花加工及其普通圆柱电极



1. 工件 2. 脉冲电源 3. 主轴 4. 多头螺旋槽电极
5. 工作液 6. 过滤器 7. 泵

图 6 电火花加工及其多头螺旋槽电极

螺旋槽电极受枪管和炮管内膛线的启发。膛线为均匀分布于孔内的多条螺旋槽, 通常在炮管、枪管内孔的壁上加工有膛线, 当气体流过膛线时快速旋转, 带动弹丸旋转, 产生陀螺效果, 从而稳定弹道, 增加射程。膛线的发明与设计大大增加了火炮和枪的命中率。

电极所加工的孔直径大于电极, 换言之, 深孔内表面与电极外表面之间有间隙。间隙的存在是导致电极走偏的原因之一, 当振动及其它外界干扰存在时, 电极更容易走偏。电极工作时相对于工件旋转, 有冷却液从电极与所加工孔内壁之间的间隙流出, 流出时带走金属碎屑、炭黑等电蚀产物。

参照枪、炮中的膛线, 采用电火花加工深孔时, 在电极外圆表面加工多条螺旋浅槽。适当加快液体流动速度, 在此条件下, 在电极外圆表面加工有多条螺旋浅槽后, 考虑到电极与工件的相对旋转, 液体将快速绕电极外表面旋转, 产生陀螺作用。

陀螺具有定轴的特点, 不旋转的陀螺容易倒, 而旋转的陀螺不容易倒, 具有抵抗外界干扰的能力。因此, 螺旋槽电极的使用可提高电极稳定性, 提高抗干扰能力, 防止走偏, 减小所加工小深孔轴线的偏差角, 保证深孔加工质量。

4 工具的制作、安装与使用

现有深孔刀具系统(见图1)包括钻头和钻杆等。改进后的刀具系统带有顺锥, 其一端为现有的深孔钻头, 通过外螺纹与顺锥固定连接, 顺锥右端带有外螺纹, 与现有深孔钻杆固定连接, 顺锥由数控机床加工而成, 保证顺锥部分与现有钻头和钻杆的同轴度。顺锥最大直径小于现有钻头的基体直径, 不会影响切削液的供油, 因此, 系统显示的油液压力不低于现有加工方法。与现有深孔加工技术相比, 设置顺锥后, 深孔直线度误差均值有所下降, 方差也有下降, 其原因在于切削液流过顺锥时具有稳定刀具的作用。所加工深孔内表面粗糙度有所降低, 可能的原因是油膜吸收了系统的振动。深孔的

其它质量指标与现有加工技术相当,符合技术要求,深孔加工工序合格率得到提高。

本项目组尚未进行以液力稳定多头螺旋槽电极(工具)的实验。国外学者进行过单头螺旋槽实验,提高了微深孔加工质量^[12],本文基于枪炮膛线原理提出的多头螺旋槽电极与单头螺旋槽有本质的区别,将多头螺旋槽电极用于加工微小孔,有望取得更好的效果。

5 结语

(1)深孔结构具有多种功能,深孔刀具一般为细长杆,长径比大,刚性差,易发生振动、偏斜和弯曲变形,影响深孔直线度及孔的表面粗糙度、圆度、尺寸精度。

(2)顺锥结构具有稳定深孔刀具的作用。切削液从进油口流入,流过钻杆、顺锥、钻头,冷却切削部位后带着铁屑从钻头、顺锥和钻杆的内孔流出,回到油箱。顺锥与已加工深孔孔壁构成环状间隙。切削液流过顺锥时,从大的间隙流向小的间隙,当顺锥及其固定连接深孔刀具系统出现偏心时,切削液内压力分布发生变化,产生一个径向力,推动顺锥,消除或减小刀具系统的偏心距。

(3)螺旋槽结构具有稳定深孔电火花加工电极的作用。在电极外圆表面加工多条螺旋浅槽,使液体快速绕电极外表面旋转,产生陀螺作用,提高电极稳定性和抗干扰能力,防止走偏。

参考文献

- [1]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.
- [2]王世清.深孔加工技术[M].西安:西北工业大学出版社,2003.
- [3]于大国.深孔加工与检测技术创新[M].北京:国防工业出版社,2016.
- [4]L Kong,J H Chin,Y Li,et al. Targeted suppression of vibration in deep hole drilling using magneto-rheological fluid damper[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014,214(11): 2617-2626.
- [5]Chynshu Deng,Jenchen Huang,Jihua Chin. Effects of sup-

port misalignments in deep-hole drill shafts on hole straightness[J]. International Journal of Machine Tools Manufacture,2001,41:1165-1188.

- [6]高本河,郑力,李志忠,等.深孔钻削中孔轴线偏斜的纠偏理论与方法研究[J].兵工学报,2003,24(2):234-237.
 - [7]朱派龙,戚长政,温志远,等.超大深径比深小孔的工艺方法和电极研制[J].机械工程学报,2006,42(2):198-202.
 - [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(3):101-106.
 - [9]Yu D G. Deep hole drill with positive taper and principle for elimination of drill deviation using cutting fluid[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2017,89(9-12):3195-3206.
 - [10]Gong R Z,Li D Y,Wang H J,et al. Analytical solution of reynolds equation under dynamic conditions[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J-Journal of Engineering Tribology,2016,230(4):416-427.
 - [11]于大国.自纠偏深孔加工系统:中国.201410367893.3[P].2015.
 - [12]Wang K,Zhang Q,Zhu G,et al. Experimental study on micro electrical discharge machining with helical electrode[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2017,93(5-8):2639-2645.
- 第一作者:于大国,博士,副教授,中北大学机械工程学院,山西省深孔加工工程技术研究中心,030051 太原市
- First Author: Yu Daguo, Doctor, Associate Professor, School of Mechanical Engineering, North University of China, Deep Hole Machining Center of Shanxi Province, Taiyuan 030051, China