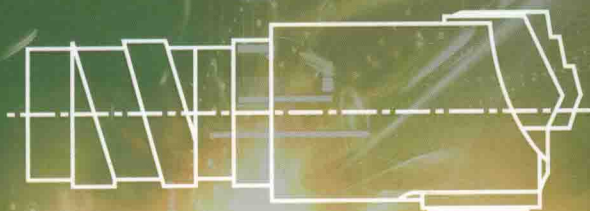


// 国家国际科技合作专项项目资助专著 //

# 深孔加工与 检测技术创新

Inventions of Deep Hole  
Machining and Inspection

■ 于大国 著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

国家国际科技合作专项项目资助专著

# 深孔加工与检测技术创新

于大国 著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

深孔加工与浅孔加工及其他切削加工相比, 难度较大。本书介绍深孔加工与检测的创新技术方案。

本书共 5 章, 第 1 章为深孔加工简介; 第 2 章为深孔加工装备, 介绍在深孔加工装备方面的创新; 第 3 章为深孔直线度检测, 阐述多种卧式、立式深孔直线度检测方案; 第 4 章为深孔加工液力纠偏, 提出借助切削液的作用力防止和自动纠正深孔刀具偏斜的技术方案; 第 5 章为深孔加工非液力纠偏, 给出了在深孔加工过程中实时检测刀具位置并利用机械作用力纠正刀具偏斜的技术方案。其中深孔刀具液力纠偏方案和基于电致伸缩、热胀冷缩原理的深孔刀具非液力纠偏方案具有突出的创新性, 为解决深孔加工纠偏这一世界性难题提供了值得深入研究的技术方案。本书重在阐述深孔加工与检测的技术创新, 不介绍深孔加工的全部知识体系。

本书可供已有深孔加工知识的技术人员或机械类专业研究生学习参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

深孔加工与检测技术创新/于大国著. —北京: 国防工业出版社,

2016.3

ISBN 978-7-118-10827-9

I. ①深… II. ①于… III. ①孔加工 IV. ①TG52

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 053938 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

\*

开本 710×1000 1/16 印张 7 $\frac{1}{4}$  字数 161 千字

2016 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 80.00 元

---

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

# 序

深孔是重要的结构，具有多方面功能。车床、铣床、加工中心主轴的中间孔是深孔，可用于通过棒料、拉杆等零件。工程机械液压缸内孔、煤矿液压支架缸体孔、发动机和发电机的冷却水通道属于深孔，用于容纳或传输液体介质。模具中的深孔具有成型功能。大型水力、火力发电机轴中心的深孔能改善发电机的力学性能。石油化工装备中的反应管道系属于深孔，是特殊的工作室。枪管、炮管内的深孔既是火药燃烧的工作室，又具有精确导向的功能。

与浅孔或其他外表面加工相比，深孔加工难度较大。其切削过程在相对封闭的空间内完成。操作人员难以直接观察到刀具的切削状态，切削热不易散发，切屑难于排出，刀具系统刚性差，易于变形或走偏。由于深孔加工的特殊性，深孔加工与浅孔加工在原理上存在本质差别，深孔加工方法并非浅孔加工原理的拓展应用。

深孔加工技术至今仍不及一般金属切削加工那样成熟，尚处于发展阶段。目前，在深孔加工过程中，精确检测刀具的实际位置比较困难，也不容易实时测量深孔直径和深孔的形状位置误差。虽然可以监测工艺系统的振动、切削液温度的变化，但即使发现存在刀具走偏等异常加工状态，也难以在运行过程中纠正刀具的偏斜。不少机械制造单位为了保证深孔加工精度常常采用了较大的机械加工余量。另外，实际生产中，测量2m以上深孔的中间尺寸和深孔的形位误差常常采用间接或近似的测量方法。

中北大学致力于深孔加工研究数十年，取得了深孔加工技术和研究生培养等方面的成果。于大国老师提出了多种深孔加工与检测新方案，创新方案具有学术水平或应用价值，其中部分方案有望达到国际先进甚至领先的水平。其最新研究成果以《深孔加工与检测技术创新》一书出版，这是一件具有学术价值的事情。该书包括深孔加工装备、深孔直线度检测、深孔加工液力纠偏、深孔加工非液力纠偏等多方面内容。所介绍的深孔加工装备内容广泛，涉

及圆柱深孔与圆锥深孔的加工、深孔钻镗床与辅助深孔加工装置,还包括枪钻刃磨装置等内容。针对2m以上深孔轴线直线度检测问题,该书提供了多种应用激光、超声波测量深孔轴线直线度的检测装置及检测方法。为解决深孔加工在线检测与纠偏这一机械制造行业的技术难题,作者将流体动压润滑轴承中楔形油膜承载机理引入深孔加工中,同时借鉴液压传动中倒锥引起液压卡紧、顺锥自动定心的原理,形成了深孔加工液力纠偏方案。该技术方案具有突出的创新性。该书所阐述的基于电致伸缩、热胀冷缩原理的深孔刀具非液力纠偏方案具有结构简单、体积小的优点,为简化纠偏装置结构提供了重要思路。

中北大学副校长、教授、博士生导师 沈兴全

2015年10月8日

# 前 言

深孔加工技术起源于枪管、炮管内孔加工的需要,今天仍在军事装备制造方面发挥着重要的作用。随着经济与技术的发展,深孔加工日益广泛应用于机床、煤矿、铁路、航空航天、船舶、石油等众多行业。

机械制造行业将孔分为浅孔和深孔,这种划分具有重要的学术意义。以加工浅孔的技术方案加工深孔难以取得满意的加工质量和效率。深孔加工具有以下特点:① 加工过程在相对封闭的空间内完成,难以直接观察到刀具的切削情况;②切削热不易散发;③切屑不易排出;④由于孔的长径比较大,工艺系统刚性差,易产生振动,所加工的深孔容易偏斜。

与浅孔加工及其他切削加工相比,深孔加工难度较大。针对深孔加工过程中的实际问题,作者在深孔加工与检测方面进行了一系列技术探索。作者出版本书旨在与同行交流,吸收众人意见,进一步修改和完善方案。

本书共 5 章,第 1 章为深孔加工简介;第 2 章为深孔加工装备,介绍在深孔加工装备方面的创新;第 3 章为深孔直线度检测,阐述多种卧式、立式深孔直线度检测方案;第 4 章为深孔加工液力纠偏,提出借助切削液的作用力防止和自动纠正深孔刀具偏斜的三种技术方案;第 5 章为深孔加工非液力纠偏,给出了在深孔加工过程中实时检测刀具位置并利用机械作用力纠正刀具偏斜的三种方案。其中深孔刀具液力纠偏方案和基于电致伸缩、热胀冷缩原理的深孔刀具非液力纠偏方案具有突出的创新性,为解决深孔加工纠偏这一世界性难题提供了值得深入研究的技术方案。值得一提的是,创新性的技术方案有时犹如“初生的婴儿”,需要经历漫长的成长过程。

本书重在阐述深孔加工与检测的技术创新,不介绍深孔加工的全部知识体系。可供已有深孔加工知识的技术人员或机械类专业研究生参考阅读。

本书得到了国家国际科技合作专项项目“精密高效深孔加工关键技术合作研究”(项目编号:2013DFA70770)的资助。

在本书的写作过程中,中北大学沈兴全、庞俊忠、辛志杰、黄晓斌、李艳兰、

罗世通老师给予了关心和支持；董振博士、硕士研究生王继明、李少敏、郝永鹏、杨俊超、徐文凯以及本科生孙保龙、陆田雨、李斌、胡长青、王志辉多次协助作者编辑、校对书稿，在此表示衷心感谢！

“嘤其鸣矣，求其友声！”本书难免有诸多不足之处，作者诚挚欢迎广大读者批评指正，以利我国深孔技术的发展。

于大国

2015 年 11 月

# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第 1 章 深孔加工简介 .....          | 1  |
| 1.1 深孔加工基本术语 .....          | 1  |
| 1.2 深孔加工基本原理 .....          | 1  |
| 1.3 深孔加工特点与关键技术 .....       | 2  |
| 1.4 深孔加工分类 .....            | 3  |
| 1.5 深孔检测与监控 .....           | 5  |
| 1.5.1 深孔零件检测 .....          | 5  |
| 1.5.2 深孔加工监控 .....          | 6  |
| 1.6 深孔加工技术创新 .....          | 6  |
| 1.6.1 经典创新成果 .....          | 6  |
| 1.6.2 深孔加工需求 .....          | 7  |
| 1.6.3 未来创新方向 .....          | 8  |
| 第 2 章 深孔加工装备 .....          | 9  |
| 2.1 一种带有电磁转差离合器的深孔钻镗床 ..... | 9  |
| 2.1.1 技术概述 .....            | 9  |
| 2.1.2 技术方案说明 .....          | 9  |
| 2.1.3 技术创新 .....            | 12 |
| 2.2 一种带有摆线针轮减速器的深孔钻镗床 ..... | 12 |
| 2.2.1 技术概述 .....            | 12 |
| 2.2.2 技术方案说明 .....          | 13 |
| 2.2.3 技术创新 .....            | 17 |
| 2.3 一种带辅助支撑的圆柱深孔镗削装置 .....  | 17 |
| 2.3.1 技术概述 .....            | 17 |
| 2.3.2 技术方案说明 .....          | 18 |
| 2.3.3 技术创新 .....            | 22 |
| 2.4 基于双锥面原理的锥形深孔镗削装置 .....  | 23 |
| 2.4.1 技术概述 .....            | 23 |
| 2.4.2 技术方案说明 .....          | 23 |

|       |                       |    |
|-------|-----------------------|----|
| 2.4.3 | 技术创新                  | 27 |
| 2.5   | 超声波振动辅助深孔加工装置         | 28 |
| 2.5.1 | 技术概述                  | 28 |
| 2.5.2 | 技术方案说明                | 28 |
| 2.5.3 | 技术创新                  | 31 |
| 2.6   | 一种枪钻刃磨装置              | 32 |
| 2.6.1 | 技术概述                  | 32 |
| 2.6.2 | 技术方案说明                | 32 |
| 2.6.3 | 技术创新                  | 36 |
| 2.7   | 铤脚中孔加工流体排屑机床及自导向钻头的设计 | 37 |
| 2.7.1 | 技术概述                  | 37 |
| 2.7.2 | 技术方案说明                | 37 |
| 2.7.3 | 技术创新                  | 41 |
| 第3章   | 深孔直线度检测               | 42 |
| 3.1   | 一种孔轴线直线度激光检测装置        | 42 |
| 3.1.1 | 技术概述                  | 42 |
| 3.1.2 | 技术方案说明                | 42 |
| 3.1.3 | 技术创新                  | 45 |
| 3.2   | 一种带液性塑料的孔直线度检测装置      | 45 |
| 3.2.1 | 技术概述                  | 45 |
| 3.2.2 | 技术方案说明                | 46 |
| 3.2.3 | 技术创新                  | 49 |
| 3.3   | 一种立式深孔直线度激光检测装置       | 49 |
| 3.3.1 | 技术概述                  | 49 |
| 3.3.2 | 技术方案说明                | 49 |
| 3.3.3 | 技术创新                  | 52 |
| 3.4   | 基于数学手段的深孔直线度激光检测方法    | 53 |
| 3.4.1 | 技术概述                  | 53 |
| 3.4.2 | 技术方案说明                | 53 |
| 3.4.3 | 技术创新                  | 54 |
| 3.5   | 圆周定位激光深孔直线度检测装置       | 54 |
| 3.5.1 | 技术概述                  | 54 |
| 3.5.2 | 技术方案说明                | 55 |
| 3.5.3 | 技术创新                  | 57 |
| 3.6   | 超声深孔直线度检测方法及装置        | 58 |
| 3.6.1 | 技术概述                  | 58 |

|       |                         |    |
|-------|-------------------------|----|
| 3.6.2 | 技术方案说明                  | 58 |
| 3.6.3 | 技术创新                    | 62 |
| 3.7   | 一种单激光单 PSD 储存式深孔直线度检测装置 | 63 |
| 3.7.1 | 技术概述                    | 63 |
| 3.7.2 | 技术方案说明                  | 63 |
| 3.7.3 | 技术创新                    | 69 |
| 3.8   | 带有防转机构的激光深孔直线度检测装置      | 69 |
| 3.8.1 | 技术概述                    | 69 |
| 3.8.2 | 技术方案说明                  | 70 |
| 3.8.3 | 技术创新                    | 72 |
| 第 4 章 | 深孔加工液力纠偏                | 73 |
| 4.1   | 一种纠偏钻杆                  | 73 |
| 4.1.1 | 技术概述                    | 73 |
| 4.1.2 | 技术方案说明                  | 73 |
| 4.1.3 | 技术创新                    | 78 |
| 4.2   | 自纠偏深孔加工系统               | 78 |
| 4.2.1 | 技术概述                    | 78 |
| 4.2.2 | 技术方案说明                  | 79 |
| 4.2.3 | 技术创新                    | 82 |
| 4.3   | 一种斜面结构后置的孔加工刀具          | 82 |
| 4.3.1 | 技术概述                    | 82 |
| 4.3.2 | 技术方案说明                  | 82 |
| 4.3.3 | 技术创新                    | 86 |
| 第 5 章 | 深孔加工非液力纠偏               | 87 |
| 5.1   | 深孔加工在线检测与纠偏装置           | 87 |
| 5.1.1 | 技术概述                    | 87 |
| 5.1.2 | 技术方案说明                  | 87 |
| 5.1.3 | 技术创新                    | 90 |
| 5.2   | 深孔钻削在线检测与纠偏系统           | 90 |
| 5.2.1 | 技术概述                    | 90 |
| 5.2.2 | 技术方案说明                  | 91 |
| 5.2.3 | 技术创新                    | 95 |
| 5.3   | 基于激光探测原理的深孔加工在线纠偏装置     | 95 |

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 5.3.1 技术概述 .....   | 95  |
| 5.3.2 技术方案说明 ..... | 96  |
| 5.3.3 技术创新 .....   | 99  |
| 附录 部分发明专利证书 .....  | 100 |
| 参考文献 .....         | 110 |

# 第1章 深孔加工简介

本章简要介绍深孔加工的基础知识，为读者理解后续各章作必要准备。

## 1.1 深孔加工基本术语

(1) 深孔。一般规定孔深和孔径之比大于 5 的孔为深孔，孔深和孔径之比不大于 5 的孔为浅孔。

(2) 深孔零件。它是具有深孔结构要素的机械零件的泛称。最常见的是回转体深孔零件，包括管型零件和缸体零件等。随着装备门类的增多，非回转体深孔零件也较为常见。除在零件的中心加工深孔外，有时还要求在回转体、非回转体零件上加工周边深孔、平行坐标深孔、相交深孔、重叠深孔、异型深孔等。在深孔零件的全部加工成本中，深孔加工往往占有最大的比重。

(3) 深孔加工技术。泛指用于深孔加工的工具、设备（硬件）和加工原理、操作规程、操作技巧、软件等内容。在一般情况下，深孔加工技术主要指用切削加工方法加工深孔的技术。随着科学技术的发展，20 世纪涌现出一批可用于深孔加工的特种加工技术，从而扩大了深孔加工技术的领域。

现代制造技术的基本要求为：功效高并可以重复性地进行机械化大批量生产；加工质量较好，批量加工时产品质量具有较高的一致性；废品率低，从而节约原材料、降低消耗；综合加工成本较低。

现代深孔加工技术的基本标志为：能连续、自动排屑及冷却润滑；刀具、工具应具备较好的自动导向功能。

(4) 深孔刀具。深孔刀具是专用于深孔加工的切削工具。包括深孔钻头、深孔扩钻、深孔套料钻、深孔铰刀、深孔镗头、深孔拉刀等。其共同特点是刀具具有进、出切削液的通道和导向部分。以高硬或超硬颗粒磨料为加工主体的定直径（或直径可以微调）的磨料工具，也被用于深孔加工。例如，深孔珩磨头、深孔磨头、电镀金刚石（或立方氮化硼）的珩具等。

## 1.2 深孔加工基本原理

### 1. 深孔加工刀具的非对称结构

浅孔加工常采用对称刀具，深孔加工常采用非对称刀具。

用实体钻头钻孔时，总是希望钻头能自始至终沿其自身轴线的方向进给，以获得形状与位置精度理想的孔。但由于各种实际因素的影响，理论上二切削刃完全对称的双刃钻，用于加工深孔时却不能实现上述要求。通常所用的麻花钻适合加工浅孔而不适合加工深孔。如果以浅孔刀具加工深孔，钻头容易走偏，加工质量差。

2. 深孔加工刀具的自导向原理

深孔加工刀具的自导向功能与其非对称结构有关。图 1-1 是一种深孔刀具，为单边刃钻头，具有非对称结构。图中 1 为空心的钻头刀体，2 和 3 为导向条，4 为切削刃。导向条 2 和 3 不起切削作用，而是与深孔已加工表面接触，起导向作用。为了提高耐磨性，两个导向条材料常采用硬质合金。两导向条承受径向力，在力的作用下，导向条在深孔加工的过程中始终与已加工深孔孔壁接触，沿着孔壁向待加工部分移动。因此由已加工的孔壁决定钻头的进给方向，从而实现钻头的自我导向。这种功能称为自导向功能。具有自导向功能的刀具，称之为自导向刀具。单边刃钻头以已加工深孔孔壁为基准，实现稳定的自导向，能够加工出直的深孔。两导向条在深孔加工过程中对孔壁起碾压的作用，可大幅度降低深孔表面的粗糙度。

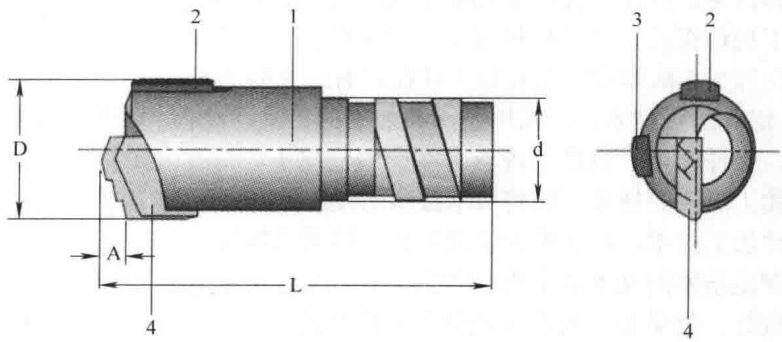


图 1-1 单边刃深孔钻头的结构

1-刀体；2-导向条；3-导向条；4-切削刃。

单边刃结构成为现代深孔钻的共有特点。单边刃内排屑深孔钻可演变为多刀齿在钻头轴线两侧不对称分布的错齿深孔钻，但错齿深孔钻及其他深孔刀具的自导向原理与单边刃钻头相同。

3. 排屑、冷却、润滑

在深孔加工过程中，需加入一定压力的切削液，流过钻头内部、流过钻头外部与已加工深孔孔壁之间的间隙，实现排屑、冷却、润滑。

1.3 深孔加工特点与关键技术

深孔加工是机械加工领域的重要分支，由于深孔加工是在封闭或半封闭条件

下进行的，因此与一般零件加工相比，它具有以下特点：

(1) 难以直接观察到刀具的切削情况。目前常常凭经验，通过听声音、看切屑、观察机床压力表、触摸振动零部件等外观现象来判断切削过程是否正常。

(2) 切削热不易传散。一般切削过程中 80% 的切削热被切屑带走，而深孔钻削只有 40% 的切削热被带走，刀具吸收了大部分的切削热，加之容屑空间小，切削热不易传散，刃口的切削温度可达 600℃，必须采用有效的强制冷却方式。

(3) 切屑不易排出。由于孔深，切屑经过的路线长，容易发生堵塞，因此，切屑的长短和形状要加以控制，并要进行强制性排屑。

(4) 工艺系统刚性差。孔的长径比较大，钻杆细而长，刚性差，易产生振动，钻孔易走偏，因而支承与导向极为重要。

深孔加工中需要解决的关键性技术问题有以下方面：

(1) 合理导向。由于深孔的长径比大，钻杆细而长，刚性较低，易产生振动，并使钻孔偏歪而影响加工精度和生产效率，因此深孔加工的导向问题需要有稳妥的解决方法。

(2) 排屑、冷却。深孔加工中的切屑不易排出，切削热不易散发，常常利用高压切削液强制排屑，同时进行强制冷却与润滑。

(3) 切屑的处理。包括分屑、卷屑和断屑三个方面。深孔加工的排屑是十分重要的问题，尤其是小直径深孔，排屑空间很小，排屑条件更为恶劣。需要注意的是，不能片面追求断屑，某些难切削材料的深孔加工，不断屑是正常切削的前提。

以上三个方面构成了深孔加工技术的核心，而所用的刀具、装置和设备，构成了深孔加工系统。

## 1.4 深孔加工分类

深孔加工可分为一般深孔加工（钻、镗、铰等）、精密深孔加工（珩磨、滚压等）和电深孔加工（电火花、电解等）。其中一般深孔加工应用最为广泛，以下主要介绍这种深孔加工的分类。

一般深孔加工按加工方式可分为以下五类：

(1) 实体钻削。是指从实体材料上用钻孔工具将多余的材料以切削方法加以去除的钻孔方法。实体深孔钻削虽属于初加工，但被公认为是深孔加工中难度最大、成本最高的工序。

(2) 镗孔。是对锻出、铸出或钻出深孔的进一步加工，镗孔可扩大深孔孔径，提高精度，减小表面粗糙度，还可以较好地纠正原来孔轴线的偏斜。深孔镗削可分为推镗法和拉镗法。

(3) 套料加工。用取出整体芯棒的方法在实体材料上形成圆柱孔的加工方法。包括切削方法和特种加工方法。

(4) 扩钻。是将坯件上已有的(铸、锻、轧)孔按要求扩大直径的钻孔方法。一般将扩孔视为初加工,而与铰孔、精镗孔加以区别。

(5) 铰孔。利用铰刀从已加工的孔壁切除薄层金属,以获得精确的孔径和几何形状以及较低的表面粗糙度的切削加工。铰削一般在钻孔、扩孔或镗孔以后进行,用于加工精密的圆柱孔或锥孔。

深孔加工按运动形式可分为以下四类:

(1) 工件旋转,刀具作进给运动。

(2) 工件不动,刀具旋转又作进给运动。

(3) 工件旋转,刀具做相反方向旋转又作进给运动。

(4) 工件作旋转运动与进给运动,刀具不动,这种形式采用不多。

深孔加工按排屑方法可分为以下四类:

(1) 外排屑。深孔刀具排屑方式中的一种。对实体深孔钻头而言,切削液由钻头内部空腔中流入至切削刃部,并带着切屑经钻头外部与已加工孔壁之间的空隙排出孔外。采取这种排屑方式的深孔钻,称为外排屑深孔钻。

(2) 内排屑。深孔刀具的另一种排屑方式。对实体深孔钻头而言,切削液经钻头外部的间隙流向切削刃部,带着切屑经钻头和钻杆的内腔排出孔外。

(3) 前排屑。切屑的排出方向与刀具进给方向一致。前排屑方式仅出现于对已有通孔的加工。

(4) 后排屑。切屑的排出方向与刀具进给方向相反。实体深孔钻和套料钻都采取后排屑。

深孔加工按加工系统(排屑、冷却系统)可分为以下4种:

(1) 枪钻系统。枪钻是最早用于实际生产的一种单边刃切削外排屑深孔钻头。因其产生于枪管和小口径炮管制造,故名枪钻。最早的枪钻,由钻头、钻杆和钻柄三段焊为一体,钻头切削刃由偏离轴线一侧的钻尖区分出内外两个切削刃。沿钻头和钻杆的全长上有一个前后贯通的V形排屑槽。钻杆由薄壁无缝钢管轧出V形槽而成。钻头上与V形槽的对侧有通孔,与钻杆的空腔相连,构成切削液供入通道。枪钻曾演变出一些不同的异形结构和双边刃外排屑钻头。但各种双边刃外排屑钻头并不具备枪钻的自导向功能,从严格意义上说不应该称为枪钻,但可列入外排屑深孔钻门类。枪钻系统常用于加工 $\phi 16\text{mm}$ 以下的深孔。

(2) BTA系统。跨国研究机构“钻镗孔与套料加工协会”(Boring and Trepanning Association, BTA)推出的三种规范化深孔钻头: BTA 实体钻、BTA 扩钻、BTA 套料钻。BTA系统适用于较大直径深孔的加工。

(3) 喷吸钻系统。喷吸排屑的原理是将压力切削液从刀体外压入切削区,并用喷吸法进行内排屑。切削液从进液口流入,其中 $2/3$ 切削液经内管与外管之间空隙向前流入切削区,汇同切屑进入内管中向后排,另外 $1/3$ 从内管圆周上向后倾斜的多个喷射槽(月牙槽)喷入内管,切削液喷出时产生的喷射效应能使内管里

形成负压区，加快切屑向后排出，增强了排屑效果。

(4) DF 系统 (Double Feeder System)。DF 深孔钻，也称为单管喷吸钻或双进油器深孔钻，它结合了 BTA 系统与喷吸钻系统的推吸排屑方式的优点，是一种被广泛应用的深孔钻。

## 1.5 深孔检测与监控

### 1.5.1 深孔零件检测

深孔检测是对深孔零件质量进行检验和控制的重要手段。深孔检测分为离线检测与在线检测，离线检测是对已加工完毕的深孔进行检测，以判断其是否合格；在线检测则是对正在加工中的深孔所进行的检测。

(1) 深孔孔径尺寸检测。可采用以下工具测量深孔孔径。

通用量具：游标卡尺、内径千分尺、内径百分表、内径千分表等。

专用量规：广泛应用于大批量生产中。

气动量仪：测量时将被测孔径尺寸的变化转化为气体流动压力的变化或者流量的变化。

电感测量仪：电感深孔测量仪可测量深孔直径，测量时先用标准环规调整仪器的“零位”，然后测量出孔径与标准环规的差值。

(2) 深孔直线度误差的检测。

直线度量规检测：在生产中常用专用直线度量规检测深孔直线度。它能判别直线度是否合格，但不能测出具体数值。检测时将深孔零件倾斜  $45^\circ$ ，靠量规自重自由通过深孔。

超声波测量法：超声波在同一介质中传播时，声速为一常数，遇到不同介质的界面时，就具有反射特性。因此，可以利用超声波的这一特性，对已加工的壁厚进行测量，从而间接估算出孔轴线的直线度误差。利用超声波测厚仪进行孔轴线的偏差测量，是一种操作简单、实用性强的测量方法，但其测量精度有限，测量精度主要与测厚仪显示值的分辨率有关。同时还要求零件有较高的外圆表面质量，以保证测量精度。

激光测量法：优点是测量精度高、重复误差小、检验效率高、维护费用低、使用寿命长。缺点是测量成本高、动态测量困难。

还可用臂杆法、校正望远镜测量法检测深孔直线度。

(3) 深孔圆度误差的检测。可采用百分表、千分表、圆度仪等测量深孔圆度误差。

(4) 深孔表面粗糙度的检测。可采用比较法、针瞄法、光切法、干涉法、印模法检测深孔表面粗糙度。

(5) 深孔加工的自动检测。深孔加工的自动检测是利用气动量仪、电动量仪、

光栅、磁栅、感应同步器、激光及传感器等对机床、刀具及工件进行多项指标的检测。例如,深孔加工过程中,为了检测深孔轴心线偏移,可采用感应式应变片测量法:在刀杆的适当部位粘贴 $X$ 和 $Y$ 方向的应变片,检测信号经放大、处理,即可确定出加工时刀杆所产生的偏移及直线度误差,进而近似估算深孔的直线度误差。

### 1.5.2 深孔加工监控

深孔加工是在封闭或半封闭条件下进行的切削加工,存在很多不利因素,容易出现质量问题。为保证深孔加工过程稳定,降低废品率,对深孔加工过程进行动态监测成为深孔加工的重要课题。

(1) 外观监测法:观察机床主机电流表和液压系统压力表的异常变化;观察、比较切屑形状的变化;观察钻杆和机床的振动情况。这些方法一般依靠操作者的经验判断加工状态,具有一定的局限性和不确定性。

(2) 力与振动监测法:利用传感器,实时测量切削力的变化、切削系统振动频率和振幅的变化,进而判断刀具的磨损或破损状况。

(3) 功率监测法:加工过程中当深孔加工轴向力和扭矩发生变化时,电机输出功率将发生变化。根据检测系统测得的电机功率的变化,判断深孔加工状态。

## 1.6 深孔加工技术创新

### 1.6.1 经典创新成果

为优质高效低成本地加工出零件上的浅孔或深孔,机械制造行业不断进行技术创新,取得了各种不同的成果,以下简要介绍不同阶段的部分重要创新成果。

(1) 扁钻:是两个切削刃对称分布于钻头轴线两侧的双刃钻,是最早出现的有代表性的一种钻头。它产生于18世纪初,用于加工金属实体的浅孔或深孔。

(2) 麻花钻:由于扁钻切削刃不锋利,存在横刃,工效极低,且钻头易走偏,美国人于1860年对扁钻进行了改进,发明了麻花钻,提高了孔加工效率,在钻孔领域迈出了重要的一步。

(3) 炮钻:由于麻花钻加工深孔时钻头易于走偏及弯曲,18世纪末出现了炮钻。炮钻具有单切削刃,因其非对称结构,以及有良好的自导向功能,在加工深孔时刀具走偏量为减少,能钻出直线度很高的深孔,是现代深孔钻的早期模式。这种单边刃钻头因最先用于加工炮膛而称为炮钻。

(4) 枪钻:由于炮钻不具备自动连续排屑、自动冷却润滑的功能,无法用于现代化生产,难以满足枪炮生产迅速发展的需求。20世纪初,德国、英国、美国等国家的军事工业部门先后研制出了“枪钻”。枪钻为单切削刃刀具,具有自导向