

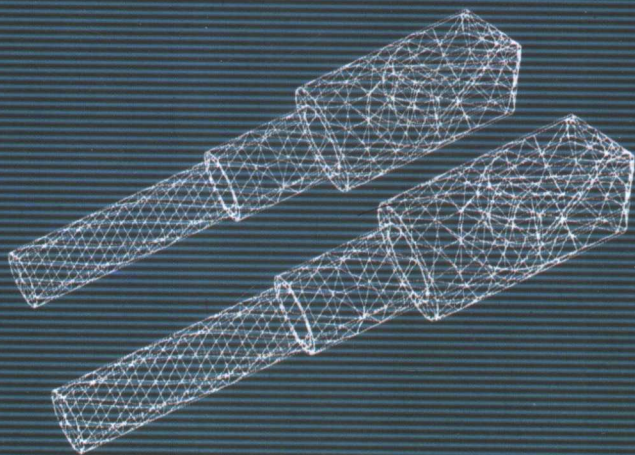
机械工程

国防科工委「十五」规划专著



现代深孔加工技术

王 峻 编著



哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社

西北工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

TG520.6
W-434



国防科工委“十五”规划专著·机械工程

现代深孔加工技术

王 峻 编著

哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
西北工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书共三篇。第一篇系统介绍三大类现代深孔钻削(外排屑、内排屑、喷吸钻)的技术和理论成果;第二篇介绍各类深孔精加工技术及特种加工技术在深孔加工中的应用;第三篇在总结、评价国际深孔加工技术得失的基础上,简要介绍作者本人 20 世纪 80 年代以来,在深孔加工技术方面的专利及非专利成果——单管内排屑喷吸加工技术(SIED 技术)及装备。

本书可作为机械工程类学科大学生、研究生的选修课教材或参考书,还可供相关专业科研工作者、工程技术人员和技师、技工参考和阅读。

图书在版编目(CIP)数据

现代深孔加工技术/王峻编著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2005. 2

(国防科工委“十五”规划专著. 机械工程)

ISBN 7-5603-2105-4

I. 现… II. 王… III. 深孔钻削 IV. TG52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 125981 号

现代深孔加工技术

王 峻 编著

责任编辑 潘鑫 黄菊英

哈尔滨工业大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号(150006)

发行部电话:0451-86416203

E-mail: press@0451.com

肇东粮食印刷厂印刷

开本: 850 × 1168 1/32 印张: 14.375 字数: 370 千字

2005 年 2 月第 1 版 2005 年 2 月第 1 次印刷 印数: 3 000 册

ISBN 7-5603-2105-4/TH·125 定价: 26.00 元

国防科工委“十五”规划专著编委会

国防科工委“十五”规划专著编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任:张华祝

副主任:陈一坚 屠森林

编 委:王文生 王泽山 卢伯英 乔少杰

刘建业 张华祝 张近乐 张金麟

杨志宏 杨海成 肖锦清 苏秀华

辛玖林 陈一坚 陈鹏飞 武博祯

侯深渊 凌 球 聂 武 谈和平

屠森林 崔玉祥 崔锐捷 焦清介

葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其它技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大



量军工技术转向民用,为发展国民经济做出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版200种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的100多位专家、学者,对经各单位精选的近550种教材和专著进行了严格的评审,评选



出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入二十一世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷



的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前言

深孔加工技术产生于对枪炮管的制造过程。二战结束前的几个世纪中,深孔加工技术的发展和应用的局限于相对封闭的军工领域,并以其高难度、高成本和神秘性而闻名于制造业。20世纪50年代,世界格局进入以和平和建设为主基调的时代,深孔加工技术随之脱颖而出,成为“军转民”技术中的一朵奇葩,迅速被扩展应用于能源采掘、航空航天、发动机制造、机床汽车制造、石化及轻重化工、纺织机械、饲料机械、冶金、仪器仪表等广泛的产业领域。欧、日、美等先进工业国,早在20世纪50年代就纷纷开展了深孔加工技术的学术和应用研究,六七十年代形成专业化的深孔刀具和深孔机床装备制造体系,少数跨国公司迄今仍垄断着世界深孔加工装备市场,使深孔加工技术成为制造技术门类中最昂贵的技术之一。

阻碍深孔加工技术成为“大众化”制造技术的另一个深层次原因在于深孔加工技术研究工作的滞后。自20世纪30年代枪钻问世到40年代BTA钻推出,深孔加工刀具及其排屑技术在半个多世纪中鲜有突破性的发展。虽然枪钻和BTA钻各自有它们的固有缺陷,尽管为改进BTA钻而推出了双管喷吸钻和DF系统,但在实体深孔钻领域中至今仍然存在着“钻小深孔靠枪钻、钻大深孔靠BTA钻、用不起深孔钻就靠麻花钻”的现实。



我国机械工业技术基础不足,改革开放以来,机械兵工企业一度处于发展低谷。20世纪80年代后期经济进入快速发展阶段,各行业对深孔加工技术和先进深孔加工装备提出了广泛需求。但由于大多数企业无法承受进口装备昂贵的价格和深孔刀具的高售价和高使用成本,同时又没有自己的专业化深孔加工装备生产体系,致使需求与供给之间的矛盾不断扩大。可以预见的是,先进深孔加工技术和高性能价格比的深孔加工装备的短缺,将会成为制约我国装备制造业高速发展的瓶颈之一。

编著本书的目的有三:

一、普及现代深孔加工技术知识。力求系统、准确地介绍国际上应用最普遍的枪钻、BTA钻、双管喷吸钻和DF钻技术,并适当加以分析、点评;重点介绍在国内外生产中具有一定实用价值的深孔刀具和专利技术;扼要介绍国内外生产中行之有效的深孔精加工技术和特种加工技术。

二、在国家专利法和有关知识产权保护法规的范围内,扼要介绍20世纪80年代以来作者自己在深孔加工技术方面取得的专利^①和非专利技术成果(简称SIED技术),以促进其国产化、现代化、专业化的实现,并推动现代深孔加工技术的进一步发展。

三、为促进深孔加工技术和装备的科学研究和现代

^① 以本书作者为发明人的下列四项实用新型专利已于2002年获得授权(其中第1、2项已同时申请发明专利),依法受《中华人民共和国专利法》第十一、十二条之保护,请读者予以关注。

- a. 分调式功率增补型喷吸钻抽屑装置(ZL01249998.6)
- b. 单出屑口内排屑喷吸钻(ZL01249999.4)
- c. 内排屑单刃深孔喷吸铰刀(ZL01249997.8)
- d. 内排屑单刃深孔钻头(ZL01250001.1)



化发展,本书力求用辩证分析和实验求证的方法,探讨各种深孔切屑刀具、装备的工作机理及优化设计思路,介绍评点国内外有创意的深孔刀具、学术研究和专利成果,探索深孔加工技术在精密深孔加工、精密浅孔加工及集约制造中的应用以及深孔加工技术的其他扩展应用。

借本书出版之机,对华北工学院机械制造工艺研究所 1981~1999 年参与过深孔加工科研工作的历届研究生和同事致以衷心感谢。其中汪志明博士、王新风研究员、霍亮生教授、米志德高工及周俊红、王磊等同志分别在 SIED 技术的奠基和后期转化工作中付出了辛勤劳动。原兵器工业部一贯给予鼎力支持,特予鸣谢。

书中不免有缺点和疏漏之处,欢迎批评指正。

王峻

2004 年 11 月

名词解释

作者按:深孔加工技术至今尚处于发展阶段,远不及一般金属切削加工技术那样成熟。有关深孔加工技术方面的国际通用标准尚属阙如。本书参照国际惯例并依据“约定俗成”的原则,对常用的相关词语暂做定义或诠释,以利于与读者沟通。

① **深孔** 在机械制造业中,一般将孔深超过孔径 5 倍的圆柱孔(内圆柱面)称为深孔。而孔深与孔径的比值,称之为“长径比”或“深径比”。相对而言,长径比不大于 5 倍的圆柱孔,可称为“浅孔”。

由于麻花钻是制造业中最常用的钻孔工具,而使用麻花钻钻孔时,一次连续进给可钻出的孔深一般不超过孔径的 3~5 倍就必须退刀排屑,以免切屑堵塞、切削刃升温而损伤钻头和工件。钻孔的深度如继续加大,则钻头退出的频率随之加大。因此,麻花钻尽管在钻浅孔时被公认为是工效很高的刀具,但在钻深孔时由于必须频繁退刀、进刀(有时还需要对钻头和被加工孔进行冷却润滑),使工效大大降低。此外,由于麻花钻在钻孔过程中易于走偏(即钻头轴线偏离预定的孔中心线,又称“跑偏”)、加工误差大、加工粗糙度较大等原因,虽然历史上曾经长期被用于钻深孔,但麻花钻及其前身——扁钻都不属于深孔刀具。

② **口径即深孔直径大小的划分** 深孔直径的大小,常常对所采用的加工技术和加工难度有重大影响。

在兵器行业中,传统上将枪炮管内径(阳线直径)及与之相应的弹丸外径称为“口径”。枪和炮就是以口径区分的:大于或等于 20 mm 者为炮,小于 20 mm 者为枪。枪械的口径又分三种:6 mm 以下为小口径,12 mm 以上为大口径,介于二者之间的为普通口



径。火炮口径为 20~75 mm 的称为小口径火炮,大于 76 mm 的称为大口径火炮。枪炮口径的区分,主要与兵器的威力大小有关。

由于深孔直径的大小直接关系到加工的难度和所采用的加工手段,所以生产实践中常常按深孔直径的大小分别称呼为特大深孔($\phi 200$ mm 以上)、大深孔($\phi 65 \sim \phi 200$ mm)、普通深孔(中等直径深孔 $\phi 20 \sim \phi 65$ mm)、小深孔($\phi 4 \sim \phi 20$ mm)、微小深孔($\phi 4$ mm 以下)。一般而言,微小深孔和特大深孔比中、小直径深孔的加工难度更大。但由于科学技术是不断发展进步的,所以以上划分仅用于行业内的沟通,并非严格的科学定义。

③ **深孔零件** 它是具有深孔结构要素的机械零件的泛称。最常见的是带有同轴深孔的管形零件和缸体零件(合称为回转体深孔零件)。随着装备门类的增多,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、异形深孔(非圆柱深孔)的事例经常可见。在深孔零件的全部加工成本中,深孔加工成本往往占有最大的比重。

④ **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)。在一般情况下,深孔加工技术主要指用切削加工方法和磨料工具加工深孔的技术。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。

⑤ **现代深孔加工技术** 现代制造技术的基本要求是:工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,从而节约原材料及其他消耗;综合加工成本较低。与此相应,现代深孔加工技术的基本标志应当是:能连续自动排屑及冷却润滑;刀具(工具)应具备较好的自导向功能。深孔实体钻削技术被公认为是深孔加工技术的关键技术。20 世纪 30 年代以前,扁钻、麻花钻、半圆形炮钻、带供油孔的麻花钻、内圆车刀等都曾用于深孔加工。但这些技术均不符合现代加工技术的基本要求。因而将枪钻、BTA 钻加工技术的出现



视为现代深孔加工技术的开端。

⑥ **深孔刀具** 深孔刀具是指专用于深孔加工的切削刀具。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)磨料工具,也已被用于深孔加工。例如,深孔珩磨头、深孔磨头、电镀金刚石(或立方氮化硼)珩具等。此类工具,参照制造业中的习惯,仍宜称之为磨具、磨头、珩具。但国内也有称电镀金刚石珩具为“电镀金刚石铰刀”。

⑦ **实体钻削(Solid Drilling)** 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。

⑧ **扩钻(Counterboring)** 扩钻是将坯件上已有的(铸、锻、轧)孔按要求进行扩大直径的钻孔方法。在某些情况下(如没有直径合适的实体钻头,或机床功率不够大等),扩钻也可作为实体钻削的补充手段,但一般仍将扩钻视为初加工,而与铰孔、精镗孔加以区别。

⑨ **套料加工(Trepanning)** 用取出整体心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。

⑩ **单边刃钻头(Single-cutting drill)** 最早出现的钻头是两个切削刃对称分布于钻头轴线两侧的双刃钻,具代表性的是扁钻和麻花钻。19世纪,在炮膛加工中产生了只有单切削刃的炮钻。20世纪30年代初,在炮钻结构的基础上经过改进,产生了具有供油排屑通道的单边刃钻头——枪钻,40年代初又发展出另一种单边刃深孔钻头——BTA钻。单边刃钻头为在深孔钻头上开设供油、排屑通道提供了可能。由切削刃对面的圆柱面承受切削刃所受径向切削力的反力,又恰好使钻头获得了自导向作用。因此,单边刃结构成为现代深孔钻的共有特点。随后,单边刃内排屑深孔钻又



演变为多刀齿在钻头中轴两侧不对称分布的错齿深孔钻,但仍然属于单边刃钻头。

⑪ **外排屑 (external chipremoval)** 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供入至切削刃部,并伴随切屑经钻头外围与已加工孔壁之间的空隙排出孔外,这种排屑方式称为外排屑。采取这种排屑方式的深孔钻,称之为外排屑深孔钻。

⑫ **内排屑 (internal chipremoval, inner chipremoval)** 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,这种方式称为内排屑。

⑬ **后排屑** 当切屑的排出方向与刀具进给方向相反时,称为后排屑。实体深孔钻和套料钻都采取后排屑。

⑭ **前排屑** 当切屑的排出方向与刀具进给方向一致时,称为前排屑。前排屑方式仅出现于对已有通孔的加工。

⑮ **自导向** 用实体钻头钻孔时,总是希望钻头能始终沿其自身轴线的方向进给,以获得位置度最理想的孔。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,却不能实现上述要求。单边刃钻头依靠其导向部分实现了稳定平衡,因而可以沿导向套规定的方向钻入工件,然后再由已加工孔壁预定钻头的进给方向,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,称为自导向刀具。对已有孔进行再次加工时,自导向刀具仍具有修正已有孔轴线偏差的作用。

⑯ **枪钻 (Gun drill)** 产生于 1930 年,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(英文“Gun”兼有枪、炮双重含义)。最早的枪钻,由钻头(切削部分)、钻杆和钻柄(Driver)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 形排屑槽的对侧有通孔,与钻杆的空腔相连,构成切削液供入通道。枪钻曾演变出不同的一些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称为枪钻,但可列入外排屑深孔钻门类。

目前,枪钻的推荐钻孔直径范围为 $\phi 0.8 \sim \phi 35 \text{ mm}$ 。

⑰ 炮钻 炮钻是一种由实心圆柱体钢棒砍切而成的单边刃实体钻头。其切削部分稍大于半圆。切削刃略呈平头,有前角、后角和定径刃。切削刃的对侧砍切成斜面,从而形成单边切削刃。钻杆部分为实心圆柱体,其直径小于钻头切削部。这种钻头有良好的自导向作用,能钻出尺寸精度、圆度很高而且很光洁的深孔,但由于不具备自动连续排屑和冷却润滑功能,故无法用于现代化生产。这种单边刃钻头是现代深孔钻的早期模式,因最先用于加工炮膛而称之为炮钻。

⑱ BTA 钻 由欧洲跨国研究机构“钻镗孔与套料加工协会”(Boring and Trepanning Association,缩写为 BTA)对德国人 Beisner 发明的一种单边刃内排屑自导向深孔钻进行改进后推出的三种规范化深孔钻头的总称(BTA 实体钻、BTA 扩钻、BTA 套料钻)。

由于枪钻不适用于较大直径深孔的加工,Beisner 于 20 世纪 40 年代初参照枪钻单边刃切削及自导向的两大基本特点,推出一种由钻杆和钻头外部供入切削液,从钻头和钻杆内腔排出切屑的内排屑深孔钻头。由于钻头体和钻杆为空心圆柱体,以方牙螺纹互相连接,易于拆装更换,从而成为大直径深孔钻孔的理想钻头。Beisner 钻头的切削刃与枪钻十分相似,只有一个出屑口,专用于实体钻孔。后经 BTA 改进,成为规范化的双出屑口错齿 BTA 钻,并同时推出了结构功能类似的一种 BTA 扩钻和一种 BTA 套料钻,总称 BTA 钻。但由于 BTA 实体钻应用最多,所以习惯上将 BTA 实体钻简称为 BTA 钻。

20 世纪 60 年代,瑞典 SANDVIK/Coromant 公司推出了专业化



制造的 BTA 刀具和另一种双管喷吸钻刀具商品,将 BTA 实体钻改称为 STS 钻头(STS 为“Single Tube System”的缩写,意为单管内排屑深孔钻系统),以便与双管喷吸钻相区别。两种内排屑实体钻全部采用双出屑口错齿结构。

⑲ 双管喷吸钻(Ejector Drill) 双管喷吸钻又名喷射钻、喷吸钻、双管喷射钻。由于 BTA 实体钻对切屑形态有严格要求,一旦断屑不良,就容易发生堵屑事故。20 世纪 60 年代初,瑞典 SANDVIK/Coromant 公司推出一种在钻杆内加设一套内管的内排屑深孔钻。内管的末端稍长于钻杆(外管),刻有向后倾斜 30° 左右的一二排窄狭喷口(鱼鳞槽)。当压力切削液由内外管之间供入时,分为前后两支液流。前一支液流流向切削刃,经“反压间隙”(间隙很小的通道)得到加速,喷向切削刃部,推切屑进入出屑口。其作用与 BTA 钻的压力切削液相似。后一支液流穿过内管尾端喷口,形成环形射流,产生负压抽吸效应,从而增大内管前后的压力差,使排屑功能得以加强。双管喷吸钻包括实体钻和扩孔钻两个品种。

⑳ DF 系统(Double Feeder system,意为“双向供油系统”) 一种在双管喷吸钻基础上改进而成的单管喷吸钻技术。它是在 20 世纪 70 年代由日本冶金有限公司推出的。其钻头和钻杆与 BTA 实体钻完全相同。只是在钻杆后面的走刀箱中加设一对锥形喷嘴副,形成由前向后倾斜的圆锥形喷口。切削液分为两液流支:以 $2/3$ 的流量向前供给切削刃部(其作用与 BTA 钻相同);以其余 $1/3$ 流量提供喷嘴副,在钻杆尾端产生喷射流和负压抽屑效应。

㉑ SIED 技术 一种以 BTA、双管喷吸钻、DF 系统三种内排屑深孔钻削技术为基础,并吸收了枪钻的若干优点,经改进创新而成的单管内排屑喷吸加工技术。

SIED 技术由以下基本技术主体组成:

a. 分调式功率增补型喷吸钻抽屑装置(SIED 抽屑器)。适用于包括内排屑深孔钻、深孔扩钻、套料钻、深孔铰刀、深孔镗头、电镀金金刚石深孔珩具在内的各种内排屑深孔刀具。可将内排屑实体