

第六届飞机制造技术学术会议

论文集



中国航空学会工艺专业委员会
航空工艺技术研究开发中心

1990

V262-53
1001

第六届飞机制造技术学术会议

论文集

本书承 林兆荣教授 赠，
特此致谢， 中国图书馆

90年12月20日



30271035

中国航空学会工艺专业委员会
航空工艺技术研究开发中心

1990

681750

林

编者的话

先进的制造技术是先进产品发展的基础和保证。近代飞机制造业的发展表明,制造技术是综合性很强的技术。由于飞机产品结构的复杂性,对质量和可靠性的苛刻要求,因而飞机制造技术已发展成为以高技术为基础的制造工程科学。飞机制造技术的发展,对飞机的发展无论在过去、现在、还是将来,都起着决定性的作用。所以许多航空工业发达的国家始终对制造技术给予高度重视,而且近年来将其提到更为显赫的地位。

三十九年来,尤其是近十年来,我国飞机制造业也取得了一定的进展。我们已掌握和应用了许多新结构的制造工艺,如飞机的整体结构、复合材料结构、耐久胶接和无孔蜂窝结构、干涉配合铆接结构等制造工艺。数控及计算机技术、钛合金超塑成形与扩散焊接、整体壁板喷丸成形和强化技术等也已成功地用于飞机制造。我们认为,虽有这些进步,但与先进国家相比,还存有相当大的差距。随着形势发展,我们要制造更为先进的飞机,开发干线飞机及适应“三来”加工的需要,对飞机制造技术将提出更高的要求。当前航空工业各级领导已肯定制造技术的重要地位,并给予很大的重视,这是发展航空制造业很重要的保证。

中国航空学会工艺专业委员会飞机工艺学组,为贯彻航空航天部提出的“航空航天为本军民结合,军工第一,民品为主,走向世界。”方针,遵照学会“为航空航天界科技工作者积极参与国内学术活动,提高科学技术水平,促进出成果,出人才,更好地为我国社会主义现代化建设服务”的宗旨。从1982年以来,曾组织过五届学术交流会,为推广与交流飞机制造先进技术取得了一定成效。即将举办的第六届学术研讨会,在航空工艺技术研究开发中心的热情指导和积极支持下,通过飞机制造行业的广大学者、专家和工程技术人员的共同努力,已将截稿日期前收到的学术论文,经组织专家评审后汇编成册。便于交流和传播。其中全文刊载的计41篇,摘要汇编的有7篇。由于时间和编辑者的水平所限,错误和不足之处,敬请读者给以批评指正。

对在本论文集编辑过程中,给予大力支持的625所及工艺中心办公室等有关领导和所有做出贡献的同志表示衷心感谢。

1990年7月北京

目 录

重视制造技术, 加强学术交流(代序).....	吴复兴 (1)
板金零件数控钻铣加工.....	申学才 (2)
高压水射流切割复合材料.....	周桂等 (8)
飞机制造中超塑成形应用研究十年.....	王纯孝 (13)
航空复合材料技术的进展和“八五”展望.....	理有亲 (18)
计算机辅助飞机装配型架设计.....	赵文功等 (21)
某机机头大型板制零件的工艺分析及技术改造.....	周维高 (30)
关于飞机设计的生产性分析.....	张纯正 (38)
民机适航条例对材料及特种工艺的要求—谈工艺评审及生产许可审定的几点 体会.....	王长源 (41)
金属减振夹层板的成形性研究.....	常荣福等 (45)
TC4钛板超塑性成形后材料机械性能.....	章伟承等 (52)
铝合金超塑性成形技术研究.....	王振国执笔 (58)
超塑胀形的圆锥杯形件厚度分布规律研究.....	张德荣等 (64)
超塑状态下钛合金TC4扩散连接研究.....	张中元等 (69)
TC4钛合金板超塑性胀形中厚度控制问题.....	黄翔等 (80)
铝超塑典型构件的静力试验分析.....	吴铁民 (90)
薄板二次拉深的理论分析.....	金德伟等 (95)
飞机板金零件分类编码与典型工艺.....	韩荣先 (101)
机翼整体壁板喷丸成形技术发展的四十年.....	李国祥 (110)
干涉铆接的非破坏性检验方法.....	沈忆玉 (118)
直杆干涉螺接应用工艺研究.....	瞿履和等 (122)
干涉螺接孔边应力场分析.....	王励等 (127)
WZ—5 整体油箱的结构和密封铆接.....	夏璿若 (132)
飞机铆接结构中有关铆钉工艺参数的控制.....	谢方琳 (138)
运十飞机油箱口盖研制胶料优选.....	罗林 (145)
建立飞机制造技术水平数学模型的若干问题.....	张德荣 (150)
复杂几何形体CAD/CAM系统的软件及自动化与智能化.....	蔡青 (157)
CAD/CAM在互换协调中的应用.....	胡肆圣 (164)
分布式数字控制系统总体结构及研制.....	张宣兴 (167)
前后机身连接交点的协调准确度研究.....	刘卫国 (175)
查清生产中不协调问题的一种有效方法.....	刘忠梁 (183)
激光—电测控制工件空间位置.....	蒋有年 (187)

航空用钢丝绳电阻熔切工艺研究.....罗师云等(195)

焊接扁管的焊缝取制问题.....赵炳森(202)

炮弹整流器件的工艺设计分析.....赵炳森(205)

飞机整体油箱制造技术.....周克胜(209)

现代飞机制造技术的发展.....李兴福等(218)

芳纶纸蜂窝规格系列之我见.....吴石民(224)

转包生产技术的推广应用.....吴志恩(229)

板金胶接结构件质量的过程控制.....吴志恩等(233)

某直升机旋翼制造技术概述.....李熙正(238)

论文摘要

飞机立体状构件的装配协调.....谢方琳(244)

对Ti—6Al—4V螺栓头热敏温度的测控.....顾中灼(244)

某客机复合材料零件制造的情况介绍.....陈尊虞(244)

超塑胀形的梯形槽厚度分布规律研究.....王宝仁等(245)

复合材料飞机壁板厚度及准确度计算.....齐淑华等(245)

铝合金板件应力松弛校形方法及在飞机制造中的应用.....周贤宾等(245)

非均匀拉伸试验设备及其应用.....常和生等(246)

(15) 罗永昌.....

(16) 刘国栋.....

(17) 刘国栋.....

(18) 刘国栋.....

(19) 刘国栋.....

(20) 刘国栋.....

(21) 刘国栋.....

(22) 刘国栋.....

(23) 刘国栋.....

(24) 刘国栋.....

(25) 刘国栋.....

(26) 刘国栋.....

(27) 刘国栋.....

(28) 刘国栋.....

(29) 刘国栋.....

(30) 刘国栋.....

(31) 刘国栋.....

(32) 刘国栋.....

(33) 刘国栋.....

(34) 刘国栋.....

(35) 刘国栋.....

(36) 刘国栋.....

(37) 刘国栋.....

(38) 刘国栋.....

(39) 刘国栋.....

(40) 刘国栋.....

(41) 刘国栋.....

(42) 刘国栋.....

(43) 刘国栋.....

(44) 刘国栋.....

(45) 刘国栋.....

(46) 刘国栋.....

(47) 刘国栋.....

(48) 刘国栋.....

(49) 刘国栋.....

(50) 刘国栋.....

(51) 刘国栋.....

(52) 刘国栋.....

(53) 刘国栋.....

(54) 刘国栋.....

(55) 刘国栋.....

(56) 刘国栋.....

(57) 刘国栋.....

(58) 刘国栋.....

(59) 刘国栋.....

(60) 刘国栋.....

(61) 刘国栋.....

(62) 刘国栋.....

(63) 刘国栋.....

(64) 刘国栋.....

(65) 刘国栋.....

(66) 刘国栋.....

(67) 刘国栋.....

(68) 刘国栋.....

(69) 刘国栋.....

(70) 刘国栋.....

(71) 刘国栋.....

(72) 刘国栋.....

(73) 刘国栋.....

(74) 刘国栋.....

(75) 刘国栋.....

(76) 刘国栋.....

(77) 刘国栋.....

(78) 刘国栋.....

(79) 刘国栋.....

(80) 刘国栋.....

(81) 刘国栋.....

(82) 刘国栋.....

(83) 刘国栋.....

(84) 刘国栋.....

(85) 刘国栋.....

(86) 刘国栋.....

(87) 刘国栋.....

(88) 刘国栋.....

(89) 刘国栋.....

(90) 刘国栋.....

(91) 刘国栋.....

(92) 刘国栋.....

(93) 刘国栋.....

(94) 刘国栋.....

(95) 刘国栋.....

(96) 刘国栋.....

(97) 刘国栋.....

(98) 刘国栋.....

(99) 刘国栋.....

(100) 刘国栋.....

重视制造技术 加强学术交流

——代序

航空工艺技术研究开发中心主任
航空航天部第六二五研究所所长

吴复兴

制造技术属于工程科学。其活动本质是借助物质手段、物化思维活动，将纸面上的产品设计转化为合格产品，并力求高效、优质和低成本。制造技术是实现设计思想、使之造福人类的关键。甚至可以说，没有制造技术，社会就不会发展，人类就不能进步。至今，人们已逐渐认识“制造技术决不是雕虫小技”。特别是国外现代生产工程的研究重心已落到制造技术上，各种高、新、尖技术大显身手，追求的目标是更新的产品、更新的技术和更高的效益。期望制造技术进一步推动和改变世界面貌。

飞机行业新产品的开发同样离不开制造技术。任何一种新机种的研制、生产和发展都取决于制造技术的掌握和完善程度。飞机制造技术在型号需求和技术推动下有计划地协调发展，就有可能为型号发展提供可靠保证。我部广大科技人员与生产工人已经在长期科研生产实践中，发挥聪明才智，积累了丰富的经验，在很多方面掌握了熟练的制造技术，有必要进行总结推广。另一方面，鉴于军品任务不足、以及人力、财力等限制，又要尽量避免一切无谓的重复工作。显见，利用信息网络，加强学术交流将是一个多快好省、切实有效的好办法。我们感谢中国航空学会提供了这一个简便、有效、科学的技术交流窗口。我们深信在学会的领导及广大会员的支持下，工艺专业委员会飞机工艺学组和航空工艺技术研究开发中心联合召开的第六届飞机制造技术学术交流会必将圆满完成加强行业交流的使命。

本届学术交流会决定将征集的论文汇编成集，以利与会学者、专家的深入研讨和商榷，扩大交流面；同时可以检阅了解本学科的发展动态及现况，也有利于学会间横向交流。这一决定本身无疑也是加强学术交流活动的有效措施，在财力许可时值得提倡。飞机制造技术的论文是应用科学论著，虽不多见抽象高深的假设和繁难的数学推导，但其中的制造方案、工艺方法、规范参数等内容都是科研生产实践的宝贵总结，字里行间凝聚着作者长期辛勤劳动的结晶，往往不乏精品之作，甚至还寓有技术诀窍，值得读者品味，相信会有所裨益。

板金零件数控钻铣加工

西安飞机工业公司 申学才

【论文摘要】

本论文主要介绍我国首次引进的现代化大型设备—BFZ—3000数控钻孔铣切铆接机床。除介绍该机床结构组成,技术性能和使用优越性外,着重谈了结合我国现有航空工业水平如何应用于飞机铝合金板金零件数控加工。其中对编程数据取制的几种可行方法,板金零件数控钻孔铣切生产详细过程,以及随着我公司在CAD/CAM技术水平的不断提高,扩大该机床使用范围等方面,作了较详细的论述和探讨。

一、机床简介

BFZ—3000数控钻孔铣切铆接机床,是我公司从西德引进的一台具有八十年代先进水平,航空工业板金零件数控钻铣加工的大型专用设备。该机床也是目前西方发达国家如法国、意大利和西德等航空工业制造中广泛使用的数控设备之一。近年来,随着我国飞机制造技术水平的不断提高,以及越来越多的国外协作产品如波音737垂直尾翼和水平安定面等高质量的需要,采用BFZ—3000数控机床加工十分必要。飞机制造中大量铝合金板金零件采用该机床钻孔铣切加工,为改善板金下料铣切工人几十年来的手推人拉落后劳动手段,为加快我国及我公司在飞机研制中CAD/CAM技术推广应用都十分有益。经过短短一年多的生产实践,该机床的优越性已初步显示出来。

BFZ—3000机床主要组成部份参见图1所示。其主轴部份共有七个工位,包括主铣轴和铣钻轴各一个,以及四个钻孔轴工位和一个铆接轴工位。该机床工作台分左右两部份,采取倾斜式安装以便于冷却液流入收集箱中。变频器以保证机床各主轴的无极调速功能,机床的操作面板上装有全部控制按钮及用于存储和编辑程序的小型计算机及显示屏幕。电气柜即数控柜中装有纸带阅读机。除此之外本机床还配备有一套专用TC—APT自动编程系统,其中包括一台32位VAX II计算机、GNT4604纸带阅读穿孔机、LUP16彩色绘图机、AL100点阵打印机以及二个VT240工作终端显示器等。

BFZ—3000数控钻铣铆机床主要技术数据如下:

可加工最大铝板材厚度	15毫米
工作行程	1250 × 3270毫米
钻孔钻头直径	Φ2.5 ~ 10毫米
铣刀直径	Φ6 ~ 25毫米
钻轴转速	≤ 18000转/分
铣轴转速	≤ 15000转/分
铆接用铆钉直径	Φ6毫米

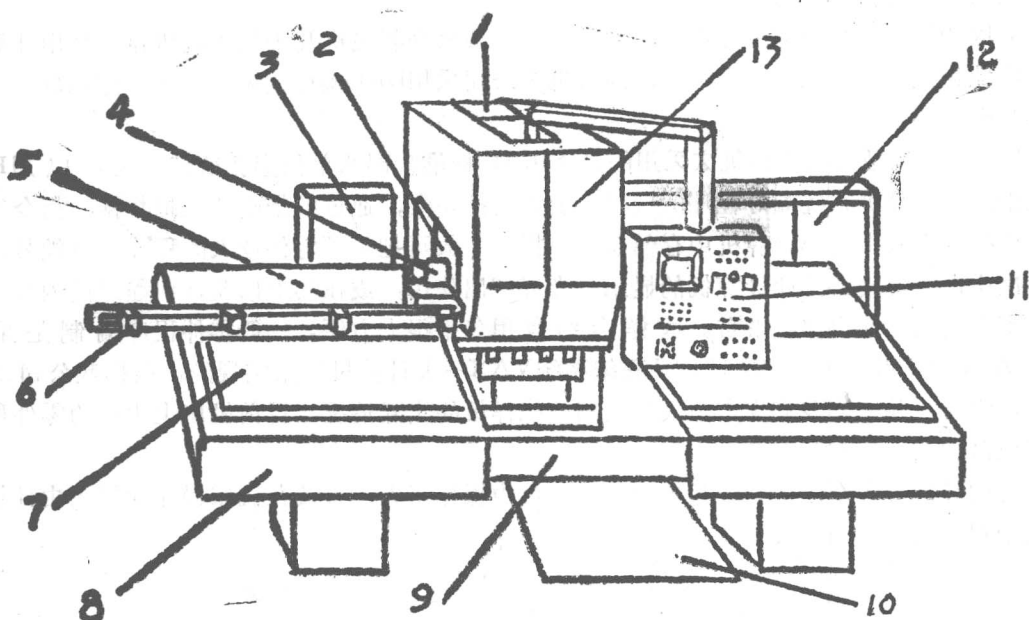


图 1

1.床身2.y轴传动3.变频系统4.进给驱动系统5.液压系统6.x轴传动7.工作台8.工作台支架9.活动支架10.安全脚踏板
11.控制面板12.电气控制柜13.钻铣 铆轴工位

最大进给速度	30米/分 ✓
位置加工精度	± 0.1 毫米
最小程序增量值	0.01毫米
标准偏差(主轴跳动)	± 0.03 毫米

二、使用优点

BFZ—3000数控钻铣铆机床采用计算机数字化自动控制加工，机床上有钻铣铆等七个加工工位，因而使零件装卡、钻孔、铣切等一系列工序全部由机床自动完成，这就使得该机床具有如下一系列优点。

1. 机床自动化程度很高；从而大大节省人力，同时也减轻了工人负担，大大改善了钣金铣工的生产环境。

2. 由于机床加工程序是直接通过图纸或计算机中提供的数据编制的；而不是采用传统的模线样板工作方法，这就可大量节省展开样板，以及制造保管样板用的经费、库房、人员等。

3. 该机床加工精度高达 ± 0.1 毫米，大大高于常规钣金铣切等手工操作的精度 ± 0.5 毫米。从而使飞机零件产品钻孔、外形公差精度大大提高。另外机床的高速切削并使用大量冷却液加工，使零件加工断面光洁度有很大提高，几乎无需打毛刺。同时减少了铝合金蒙皮表面擦划伤，精度质量的提高，废品超差品也随之减少。因而使飞机制造成本相对降低。

4. 该机床由于配备了较高级微机VAX II等一系列自动编程系统，使零件编程穿孔纸带速度加快。由于机床装卡、钻孔、铣切全部自动化，且又具有高达30米/分的进给速度。使生产工序大为减少，生产周期缩短，效率成倍增长。

5. 此机床可采用同牌号同规格的材料排样铣切，甚至进一步可自动排样下料，这样就可

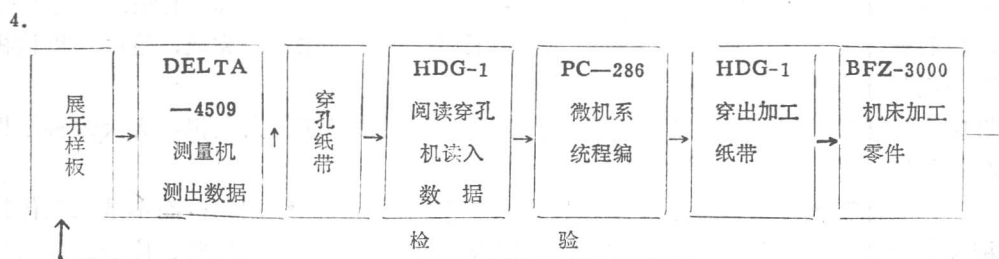
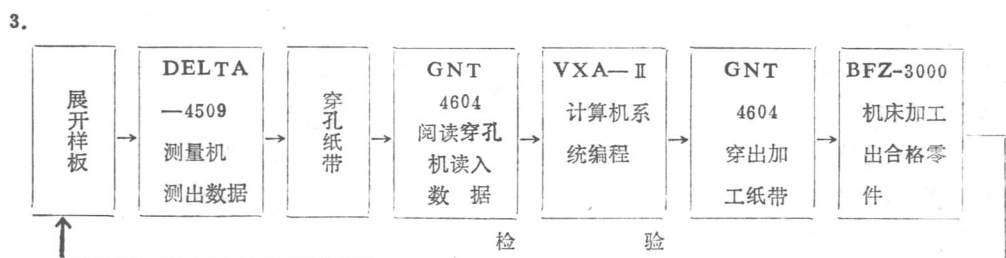
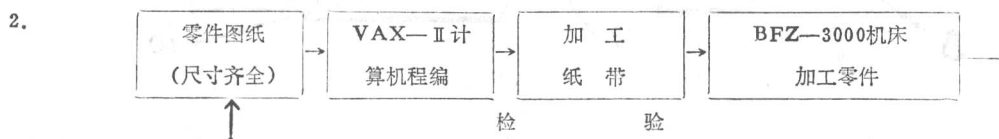
以节约大量原材料。

6. 因为BFZ—3000机床是现代化设备, 对于我公司新飞机及干线飞机研制时采用计算机辅助设计和制造, 创造了有利条件, 同时也为公司采用DNC操作技术奠定了一定基础。

三, 数据取制

BFZ—3000数控钻铣铰机床采用的是ISO国际标准代码八单位穿孔纸带, 也可以用EIA码纸带。经计算机系统编好程序的纸带, 放入数控柜中, 通过纸带阅读机把数据、指令等读入机床控制面板上的小计算机中存储起来。操作工人可把每项零件读入的程序进行编号, 以备多次生产时直接经过此计算机的显示荧光屏调出使用, 或在其上修改任何程序段内容, 这样就不必要反复使用穿孔纸带。这样会给使用带来很大方便。一般零件程序编制是采用TC—APT专用程编语言, 通过自动程编系统VAX—II计算机等来实现的。根据我公司二年来生产实践, 并结合我们生产中大量使用模线样板的实际情况, 目前机床上生产的零件程编数据取制方法大致有如下几种:

1. 图纸尺寸齐全, 形状较简单的零件, 可由操作工人, 直接在机床操作面板上由计算机手工编程, 勿需纸带。



5. 上述四种方法已被我们采用, 并正式用于生产实践, 目前看来是切实可行的。关于采用展开样板测量数据的方法, 由于中转环节较多, 易造成积累误差。况且出了错误不易查找, 效率也有待提高。所以我们尚在试验第五种方法; 就是利用数字化仪, 测量模线明胶板上的图形数据; 然后将测得数据经VAX—II计算机系统编程, 穿好加工纸带, 用于生产。

6. BFZ—3000机床及VAX—II计算机编程系统, 最适于采用CAD/CAM技术的飞机零件制造。因为这样它可以通过联机或联网计算机, 直接调出所加工零件的数据, 甚至可通过计算机系统自动编程及自动排样下料。目前法国等西方宇航公司均已采用此方法, 因此这对我公司今后新机研制的编程和数据取制创造了有利条件。

四、零件生产

根据飞机零件图纸、工艺规程及有关技术数据要求首先编好加工程序，然后穿出加工纸带，即可开始零件加工。在正式加工前，应做好一系列准备工作：如填加好冷却液；过滤切削铝屑用的过滤纸放在传送带上；按程序单要求在不同工位上装上相应直径的铣刀和钻头；铆钉筒中填放好铆钉等。关于本机床主轴各工位分布情况参见图2其中工位1即可以装卡铣刀也可以安装钻头。另外再准备好一块6毫米厚铝板做底板用，其尺寸应比所加工的最大零件尺寸长和宽每边各大至少200毫米。此底板可多次重复使用，故一般要大些为好。最后是按工艺要求切出零件用料。零件生产大致步骤如下：

1. 加工前先把板料放在底板上，对齐板料和底板的底边和右侧边。使底板上边及左边各留出180~200毫米余量(见图3,a)。另外为防止铣切中擦划伤零件表面，可以在底板与板料之间，以及板料最上边再各垫一块薄铝板。然后用专用夹子或塑料带固紧(见图3,b,c)，夹紧后把料及底板推上工作台，用机床液压夹头夹住底板，在板料上边沿(零件轮廓外)，钻孔并铆上几个铆钉，这样板料和底板就牢固的铆在一起了，此时可卸下专用夹子或塑料带。(见图3,d)

2. 第二步就是钻孔和铆接；为了防止铣切中零件挠起或脱落，要用特制铆钉把每个零件都固定在底板上。这种铆接的作用类似原板金铣切时用弓形夹子的作用。此时钻孔铆接全部按程序自动进行，无需人工操作。(见图4)这里应说明两点：其一就是要选择合适的专用铆钉，形状见图5。铆钉直径一般为 $\Phi 3.3$ ， $\Phi 5$ 和 $\Phi 6$ 三种，其铆接工位系统随所选铆钉直径不同而变化。本机床选用的是 $\Phi 6$ 直径铆钉，铆钉长度 L 应比底板与板料厚度之和尺寸 B 小1毫米；其二就是在编程时就要根据不同零件的形状，选择好恰当的铆接位置。当零件有 $\leq \Phi 6.1$ 毫米孔时，可直接利用此位置铆接；否则就要在零件外形线以外留适量耳子来进行铆接，此类耳子最后应去除。

3. 第三步就是按工艺规程要求钻出零件上各种工艺孔，如导孔、装配孔、定位孔及工具孔等。全部钻孔工作自动完成。见图6

4. 当全部孔钻完后，按程序顺利进行铣切零件外形及内孔。BFZ-3000机床有一主铣头和一个铣钻轴工位，即二个工位均可进行铣切。铣刀选择应视零件外形最小半径 R 而定，一般选用 $\Phi 10 \sim \Phi 12$ 为宜。因为切屑时进给速高达

3米/分，铣刀太细易断，而太粗则浪费原材料。铣刀选择范围在 $\Phi 6 \sim \Phi 25$ 毫米之间。由于钻孔和铣切时主轴转速高达 $1500 \sim 1800$ 转/分，因此必须开冷却液进行冷却。主轴转速及进给速度全是无级调速，使用极为方便。见图6

5. 当全部零件铣切完毕时，由于零件及废料全用铆钉和底板铆在一起，仍取不下来。此时就要进行最后一道工序即钻掉全部铆钉。用 $\Phi 6.1$ 钻头把全部铆钉钻除后，即可取下全部零

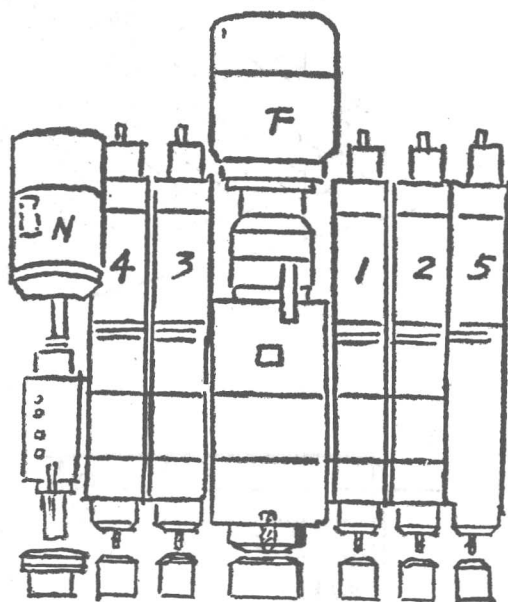


图2

F主铣头工位1. 铣钻轴工位N铆接工位2.3.4.5钻轴工位

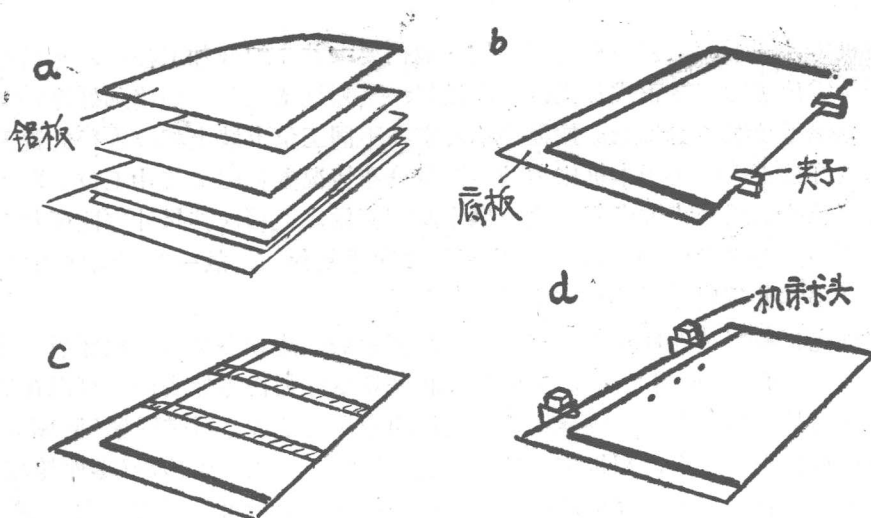


图 3

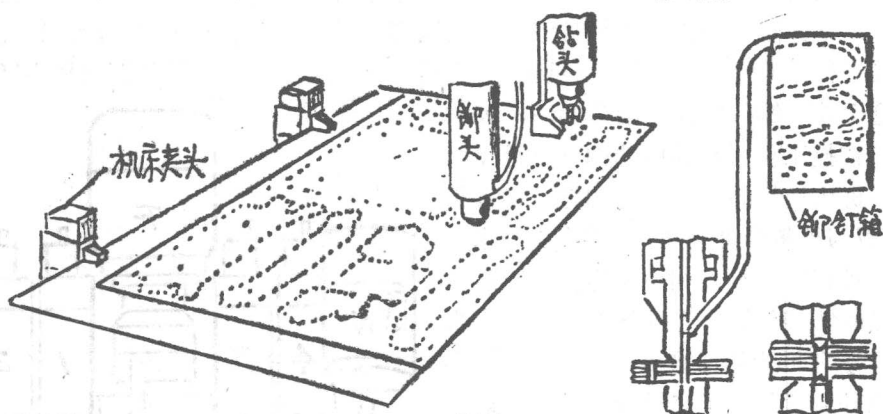


图 4

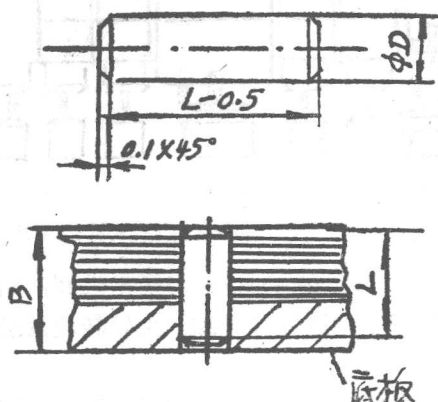


图 5

件，同时取下废料边，清洗净底板，以备再用。至此生产全部过程结束。底板上虽然有不少被铣刀划伤的0.1毫米深的痕迹，以及无数的铆钉孔，但这不影响它多次使用。当铣切零件过少过薄时，也可通过加厚底板或缩短铆钉长度来满足生产需要。见图 7

五、几点设想

1. BFZ—3000数控钻铣床，加工最大零件尺寸为1250×3270毫米。飞机上大于此尺寸的蒙皮板金件很多；因此扩大该机床的加工范围，通过二次定位等途径是可以实现的，我们准备尽量提高该机床的利用率。

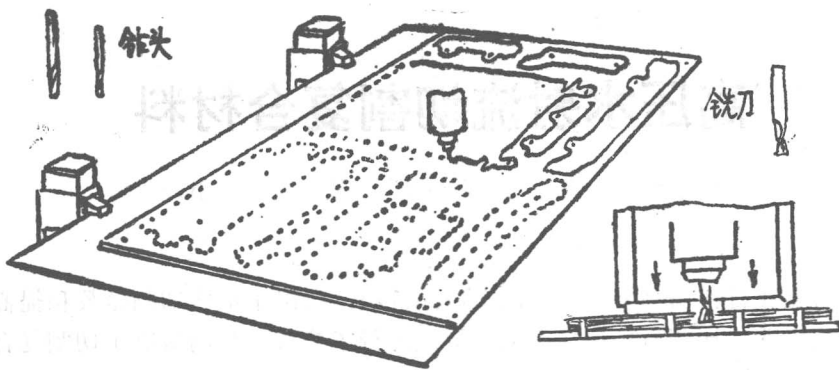


图 6

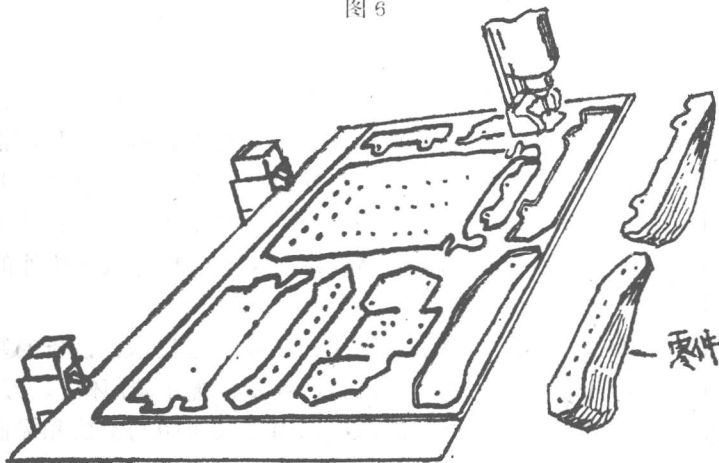


图 7

2. 目前机床所带VAX—II计算机程编系统，速度较慢。进一步改变其软件操作系统也是我们的设想之一。以及进一步把该系统与机床操作面板上的计算机实现联网，减少用穿孔纸带为媒介的老办法，会更大的提高效率。

3. 由于该机床高速钻孔和铣切，同时大量使用冷却液。加工完的零件几乎无毛刺，断面质量很光洁。若批量生产时，我们想再配备一台烘干机和去毛刺机（据悉西德已经配有此类成套设备），及时烘干残留在铝板上的冷却液对防止腐蚀和提高生产效率将更完美。

4. 现在我公司已将VAX—II计算机和公司计算站及其它单位的计算机，实现了初步联网。设想随着我公司CAD/CAM技术的不断推广使用，未来的飞机板金零件数据取制程编及加工将更上一层楼，板金零件的数控钻孔铣切加工会逐步扩大。

高压水射流切割复合材料

航空航天工业部 625 研究所 周 桂 罗小玲

【论文摘要】

本文在分析复合材料切割特性的基础上,经试验,找出了最佳切割参数和提高切割质量的辅助工艺措施,并对切割质量指标和切割机理进行了分析,从而解决了切割复合材料的技术关键,为高压水射流切割的应用开拓了广阔的前景。

高压水射流切割,是把高速水细射流的动能作为切割能,对材料进行冲蚀和挤压,以达到切割目的的一种新工艺,它是随着航空新型结构——复合材料构件的出现而发展起来的。

复合材料的比强度和比刚度都较高,所以它在航空航天领域的应用已从非承力构件扩大到承力构件,如制作机翼、尾翼等,国外已研制出全复合材料飞行器。但由于复合材料的层间剪切强度较低,在切割、开孔和补充加工时易产生分层,严重降低了构件的性能,已成为新机研制中的技术关键之一。

为解决切割复合材料的技术关键,我们在消化、吸收引进技术、设备的基础上,开发出符合国情的水射流切割机,并进行了大量工艺试验,逐步掌握了碳/环氧、芳纶/环氧和玻璃钢等复合材料的切割特性,分析了切割质量指标,找出了最佳切割参数和提高切割质量的辅助工艺措施。

现分述如下

1. 材料性能分析

材料性能与切割工艺参数的选取和采取的工艺措施有关。

经分析,碳/环氧的拉伸强度高,层间剪切强度低,脆性大,且碳纤维对基体树脂的吸附力小,材料呈明显的各向异性,因而在切割时碳纤维很容易与基体树脂脱开,切口附近易分层。芳纶/环氧的韧性好,强度高,但所含树脂较脆,各向异性显著,切割时首先被破坏的是基体树脂,芳纶纤维则在切割力的作用下变形断裂,因而在切口上出现许多纤维毛。玻璃钢一般由玻璃纤维织物压制而成,拉伸强度低,纤维对基体树脂的吸附力大,各向异性小,因而切割时不易分层,但在切割力较小时,材料在射流的冲击下也会出现分层。

2. 切割参数的选取

切割参数包括射流参数和工艺参数两部分。射流参数是影响射流切割能力的因素。对于水射流有:喷嘴前水压和水喷嘴直径,对于磨料射流有:喷嘴前水压,水喷嘴直径,磨料喷嘴直径,磨料粒度和磨料流量。工艺参数是,除射流参数外,影响切割效果的因素,如切割送进速度,靶距和切割次数等。

评价水射流的切割质量还有一个重要因素,那就是“等速核”(见射流结构图),它是射流初始段中射流各质点运动速度相等的部分,其长短与喷嘴形式和喷嘴加工质量有关。好的射

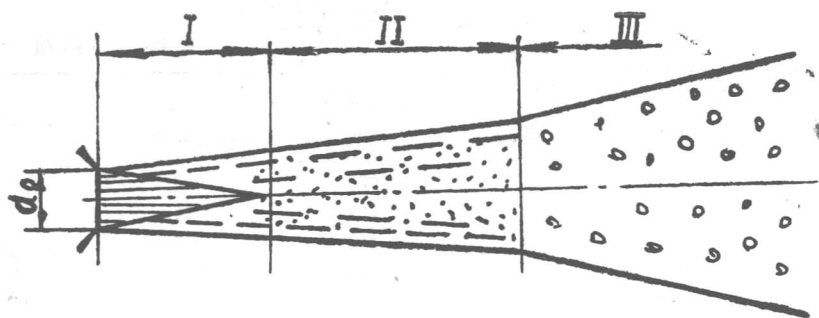


图1 射流结构图

流分三段，第Ⅰ段为等速核段，第Ⅱ段为扩散段，第Ⅲ段为雾化段。可用于切割的是等速核段及扩散段的前一部分。喷嘴质量差时，射流不会形成等速核段，也就不能用于切割。在等速核段，射流的集聚性好，能量集中，压力和速度分布均匀，因而切割效果好。

选取切割参数的原则是：在保证切割质量的前提下，使切割速率最高，即切割效率最高，能耗最小。参数选取时，应首先根据被切割材料的状态，决定合理的射流参数，再调整工艺参数和某些工艺措施(如切割角度、切割次数和附加垫板等)，以达到最佳切割状态。

经试验研究，应选取如下切割参数。

水射流切割复合材料薄板(厚度小于4 mm)，喷嘴前水压取350~385 MPa，水喷嘴直径为0.2 mm，切割送进速度为200~4000 mm/min。

磨料水射流切割复合材料时，通常选用水喷嘴直径为0.35 mm，磨料喷嘴直径为1.6 mm，磨料为60~80目天然金刚砂，磨料流量为0.6~0.9 kg/min，喷嘴前水压为210~245 MPa，切割送进速度为20~1200 mm/min。

详见表1和表2。

3. 切割质量的评定

高压水射流切割的质量指标有：切口断面斜度，切口表面粗糙度和切口边缘分层范围。

经试验分析，喷嘴前水压越高，射流速度就越快，切割能力就越强，切割材料的厚度也就越大。当材料厚度一定时，增加水压可改善切口断面斜度。

喷嘴直径加大，使水射流总切割能力加大，可增大切割厚度，但对改善切口断面斜度及表面粗糙度影响不大。值得提出的是，喷嘴直径的加大使总能耗加大，因此选择喷嘴直径时有一个最佳值。

切割速度对切口质量的影响最为明显。切割速度降低时，切口断面斜度减小，材料表面趋于光滑。

靶距的改变对切割质量影响不大，但对碳纤维复合材料，因其层间剪切强度低，切割时易分层，加大靶距后可改善分层情况。

对于磨料水射流(后混合式)来说，影响切割质量的因素除上面提到的四种外，还有磨料粒度、磨料流量，磨料喷嘴直径等。大量试验得出，当要求切割断面斜度小、切口光滑时，切割速度应降低，喷嘴前水压应适当提高，并加大磨料流量，必要时可采用粒度较小的磨料。当要求切割效率高、而对切口质量要求不高时，则需采用较高的切割速度、较高的水压，较大的喷嘴直径，以及较大粒度的磨料。当切割脆性材料，如玻璃时，需适当降低喷嘴

表 1 高压水射流切割参数

靶距: 碳纤维一般3~5mm

材料名称	切割厚度 (mm)	水压力 (MPa)	喷嘴直径 (mm)	送进速度 (mm/min)	备 注
碳纤维/环氧	1	385	0.075	1000	无纬碳纤维布正交铺层 叠合板
	1	330	0.150	2000	
	1	350	0.200	4000	
	1	210	0.100	500	
	2	350	0.200	500	
	2	350	0.250	1000	
	3	385	0.250	200	
	4	385	0.250	200	
碳纤维/环氧	2	350	0.200	4000	编织布叠合板
玻璃纤维/环氧	6	350	0.200	400	编织布叠合板
芳纶纤维/环氧	2	350	0.200	1000	无纬芳纶纤维布叠合板 纬向切割
芳纶纤维/环氧	2	350	0.200	1000	无纬芳纶纤维布叠合板 顺纤维方向切割
芳纶纤维/环氧	2	350	0.200	1200	无纬芳纶纤维布正交铺 层叠
芳纶纤维/环氧	2	350	0.200	1000	编织布叠合板

表 2 磨料水射流切割参数

靶距: 1~2mm

材料名称	切割厚度 (mm)	水 压 力 (MPa)	水喷嘴直径/磨料喷嘴直径× 磨料粒度(mm/mm×目)	磨料流量 (开启圈数)	送进速度 (mm/min)
玻璃纤维/环氧	6	140	0.30/1.0×80	2.0	100
	6	210	0.35/1.0×80	2.5	500
	6	245	0.35/1.6×60	3.0	800
	6	280	0.40/1.6×60	3.5	1200
	10	210	0.30/1.0×80	3.5	800
	10	245	0.40/1.6×60	2.0	500
	10	280	0.35/1.6×60	2.5	100
	14.45	210	0.40/1.6×60	3.0	100
	35.9	245	0.35/1.0×80	3.5	100
	80	245	0.35/1.0×80	3.5	20
碳纤维/环氧	10	245	0.35/1.0×80	3.5	500
	20	245	0.35/1.0×80	3.5	200

前水压, 尤其是打起割孔时, 水压不得超过100MPa。

4. 切割机理分析

高压水射流切割碳纤维复合材料。

当水射流的等速核段切入材料时，似锋利的刀刃能迅速将材料切断，但由于下部材料的阻滞作用，射流产生反射，反射射流冲蚀切割断面，停滞的射流形成水楔，渗入到材料里，而使其分层(见图2)，但此时的分层范围很小。若增大射流切割能力，使切断过程时间缩短，就可大大减少分层的可能。另外，在射流出口处，由于材料处于自由状态，碳纤维在射流的冲击下脱离基体树脂而发生脆断(见图3)，因而在背面常留下碳纤维的剥离痕迹。

基于上述切割过程和切割机理分析，我们利用射流的扩散区作为压边，压紧被切割材料，同时在底面垫上弹性材料，如橡皮(见图4)，用这个辅助工艺措施即可避免碳纤维板底面产生剥离。

高压水射流切割芳纶纤维复合材料。

由于芳纶纤维的拉伸强度高，韧性特别好，因而在射流的冲蚀作用下，脆性的基体树脂被破坏，芳纶纤维先变形而后被剪断(见图5)，因而在切割断面产生严重的起毛现象。

在切割芳纶纤维复合材料时，要利用射流的等速核段迅速将其切断，这样方可避免起毛现象。另外，切割靶距要尽可能选得小，切割送进速度则要选取适当，一般选 $1 \sim 1.2 \text{m/min}$

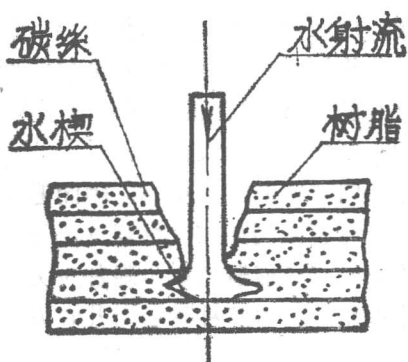


图2 切入材料的情况

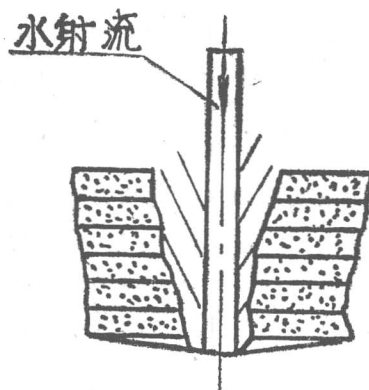


图3 碳纤维剥离情况

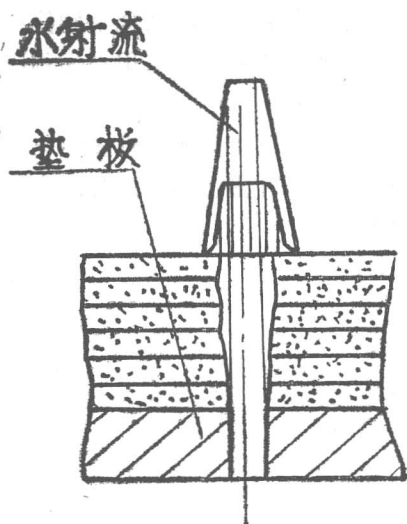


图4 工艺措施

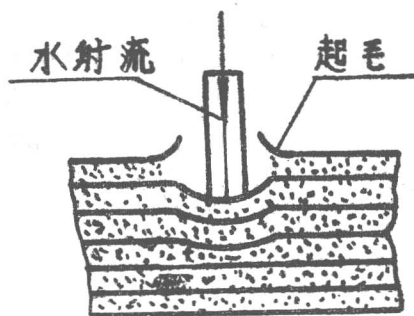


图5 芳纶纤维起毛现象

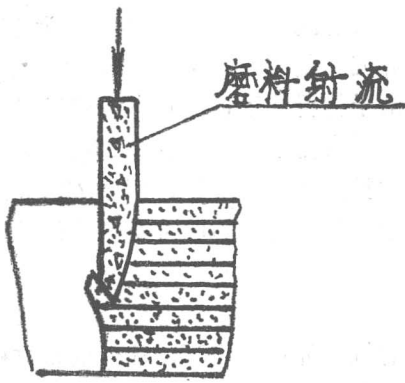


图6 磨料水射流切割

为宜。速度过快或过慢都会使断面起毛趋于严重。

磨料水射流切割玻璃钢板。

磨料水射流切割除了有水射流对材料的冲蚀作用，还有磨粒尖角的磨削作用，磨削作用是使材料破坏的主要原因(见图6)。因为磨粒锋利，有刃边，它的混入增大了水射流的动能，所以切割力增大，切割进程也快，材料不易分层。

由于玻璃钢板一般较厚，采用多次切割可提高切割效率。

5. 高压水切割复合材料的应用前景

与其它切割方法——机械切割、火焰切割、激光切割、等离子切割和线切割等相比，高压水射流切割

具有很多独特的优点，因而在航空航天工业部门应用前景广阔。

由于水本身就是切割工具，切割过程中所产生的热量绝大部分被水带走，不会造成零件切口附近的烧蚀、氧化和金相组织的变化，也无熔瘤，因而避免了材料的热变形，还可极大地减少零件后续工序的加工量。加之切缝窄，可大量节约原材料，这对贵重金属的切割尤为重要。例如切割不锈钢板和钛合金等，美国用高压水切割B1轰炸机上的钛板，板厚为6mm，后续加工工时只有其它方法的1/20，可见用水射流切割可使效率大大提高。

水切割属点切割，切割力小，尤其是沿材料送进方向和侧向的力更小，因而避免了零件由于附加应力的产生而变形，这对薄壳零件的切割十分有利。例如在飞机蒙皮上开孔，去边等，比起现在采用的振动剪切切割方法来，不仅切口质量好，还能避免产生附加应力。再如切割纸蜂窝和芳纶复合材料面板，切口质量很好，零件不变形。这两种材料用其它方法加工是极其困难的。

高压水射流切割不会产生有害粉尘，不污染环境，因而大大改善了劳动生产条件，这对航空工厂十分必要。同时水切割速度快，效率高，无毛刺，切口平整，这对于尺寸精度要求不很高的零件也可作为最终工序。例如干线飞机采用的复合材料内装饰板，玻璃钢制件，以及橡胶制品件，用水切割后切口平整光滑。美国波音飞机的内装饰地毯也是采用水切割，切割和打地毯号一次完成，效率很高。

高压水切割无需打起割孔，可以在切割线上的任意点起割，所以能实现一机多能——外形加工、开孔和内形加工，易于实现自动化和数控化。因而高压水射流切割是很有前途的加工方法，在国外已得到广泛应用，在国内也日益受到人们的关注。