DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.01.002

航空导管先进成形技术的研究进展

郭训忠1,陶 杰1,王 辉2

(1.南京航空航天大学材料科学与技术学院,南京,211106;2.南京航空航天大学机电学院,南京,210016)

摘要:针对航空领域对轻量化高性能复杂导管先进制造的迫切要求,系统综述了航空导管精确弯曲成形技术以 及多通类导管精确成形技术。航空导管的弯曲技术主要包括常规导管的数控绕弯成形技术、三维导管的自由弯 曲成形技术以及超小弯曲半径导管的充液剪切成形技术;多通类导管先进成形技术主要包括液压胀形技术以及 T-Drill成形技术。本文从工艺原理、技术优势、发展趋势等方面对航空导管技术进行了系统的阐述和介绍。 关键词:航空导管;弯曲成形;多通管;成形技术

中图分类号:TG306 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2020)01-0012-12

Research Progress on Aadvanced Forming Technology for Aviation Tube

GUO Xunzhong¹, TAO Jie¹, WANG Hui²

(1. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: In view of the urgent requirements for the advanced manufacturing of lightweight and high-performance complex tube component in the aviation engineering, we systematically summarize the bending forming technology of bend tube, and the forming technology of multi-branch parts. The bending technology mainly includes the numerical control bending technology of the conventional shape, the free bending technology of the three-dimensional parts, and the hydro-shearing technology of the ultra small bending radius components; the advanced forming technology of the multi-way tubular parts mainly includes the hydroforming technology and the T-drill forming technology. The research progress of advanced forming technology for aviation tube is introduced from the aspects of process principle, technical advantage and development trend.

Key words: aviation tube; bending forming; multi-way tubular parts; forming technology

航空工业的快速发展对高性能轻量化金属导管的需求日益增多^[1]。在航空器中,金属导管在液 压管路、环控管路系统中具有重要的应用^[2]。航空 器由于质量及空间的限制,一般无大尺寸空心构 件,且主要形式为弯管、多通以及两者的组合。如 对于弯管而言,由于相对弯曲半径小,可以有效利 用空间,使组件的整体结构更加紧凑,同时有效降 低管路系统质量^[3-4]。为保证飞机发动机的服役安 全性乃至航空器的整体安全性,高性能、高可靠性 导管的精确成形应该引起特别的重视。然而,传统

基金项目:国家自然科学基金重点(U1937206)资助项目;装备预研领域基金(61409230406)资助项目。

收稿日期:2020-01-26;修订日期:2020-02-05

作者简介:郭训忠,男,1981年生,教授,硕士生导师,主要研究方向为精密塑性成形关键技术及装备。研究成果先后荣获2016年度江苏省科学技术一等奖、2011年度中国教育部科技进步二等奖;先后主持军委科技委基础加强重点项目课题、军委装备发展部领域基金重点项目、国家自然科学基金项目等20余项。 通信作者:郭训忠,E-mail:guoxunzhong@nuaa.edu.cn。

引用格式:郭训忠,陶杰,王辉. 航空导管先进成形技术的研究进展[J]. 南京航空航天大学学报,2020,52(1):12-23. GUO Xunzhong, TAO Jie, WANG Hui. Research progress on aadvanced forming technology for aviation tube[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2020,52(1):12-23.

制造技术由于自身的局限性,制约了部分复杂空心 构件的高性能制造。采用先进塑性成形技术实现 空心构件的整体制造是一种重要的发展趋势。一 般来说,航空管路系统主要由弯曲类导管以及多通 类导管构成,本文对航空导管先进弯曲成形技术以 及多通类导管先进成形技术进行了系统的综述。

1 航空导管先进弯曲成形技术

1.1 规则导管的数控绕弯成形技术

1.1.1 数控绕弯成形工艺原理

数控绕弯是目前航空金属导管弯曲成形的传统主流技术之一,既可以实现常规"直段+弯段"的弯曲构件成形,也可实现三维连续变曲率弯曲构件的成形,可以有效提高多种金属导管甚至是难变形材料导管的成形精度、成形质量和成形效率,降低复杂弯曲构件的研制成本^[58],从而广泛应用于航空器导管精确弯曲成形中。该技术主要根据矢量理论对航空导管的弯曲过程进行数字化控制,进而实现空心构件的精确成形,其成形原理如图1 所示。



Fig.1 Schematic diagram of rotary draw bending

弯曲模被固定在机床的主轴上,机床的主轴带 动弯曲模一起转动,管坯的推进端首先被压块紧紧 地束缚在弯曲模上,夹紧块一直处于管坯弯曲端的 位置,将其紧固在镶块上,并牵引管坯随着弯曲模 转动,从而达到贴模运动的目的,当主轴转动时,管 坯就绕着弯曲模逐渐成形。在管坯内侧和弯曲模 的切点附近安置有防皱块,可以在一定程度上起到 减轻管坯内壁起皱的作用。在绕弯过程中,对于塑 性较差、壁厚较薄的管坯,如果没有一定的内部支 撑,在弯曲段容易产生截面畸变等缺陷,对于圆管 的绕弯,一般采用芯棒和圆饼芯头作为芯部来解决 这个问题。也可以采取其他方式,如在管坯内部灌 入低熔点合金或装入橡胶,这些方法相对于加芯模 成形而言,适应面较窄且生产效率低下。

1.1.2 数控绕弯成形研究现状

数控绕弯作为传统主流弯曲成形技术,在航空 导管的精确成形方面具有重要应用。如图2所示, 众多学者对航空导管的数控绕弯进行了针对性研 究,研究方法包括工艺解析、数值模拟及实验成形 等方法。研究内容涵盖了材料参数、工艺参数及热 参数等,同时借鉴前人的研究成果,本文提出了数 控绕弯有待于进一步解决的问题。

唐金星^[9]针对航空航天领域常用导管 0Cr21Ni6Mn9N不锈钢管,模拟分析了不同模具组 合、工艺参数及材料参数对其数控弯曲成形质量的 影响规律,并获得了其数控弯曲的成形极限,其研 究结果对实际生产具有重要的指导作用。同时提 出了管材数控弯曲成形极限的确定方法,并在最佳 的模具组合和合理的工艺参数下确定了规格为 Ø6.35 mm×0.41 mm的0Cr21Ni6Mn9N不锈钢管 的最小相对弯曲半径为2.0D。

方军等^[10]基于有限元仿真软件,建立了航空用 导管 21-6-9高强不锈钢管数控绕弯成形过程的三 维弹塑性有限元模型,并验证了模型的可靠性。利 用该模型研究了不同管模间隙对管材数控绕弯过 程壁厚变化及截面畸变的影响规律。通过研究发 现,增加管材-芯棒间隙、管材-防皱块间隙或减小



图 2 数控绕弯成形工艺研究现状 Fig.2 Research progress of rotary draw bending

管材-压块间隙、管材-弯曲模间隙可以减小壁厚减 薄率;减小管材-芯棒间隙或增加管材-压块间隙可 以减小壁厚增厚率,而其他管模间隙对壁厚增厚率 的影响不显著;减小管材-压块间隙、管材-弯曲模 间隙或增加管材-防皱块间隙可以减小截面畸变 率,而增加管材-芯棒间隙,截面畸变率呈现先减小 后增加的变化规律;获得了规格为ø15.88 mm× t0.84 mm×R47.64 mm的21-6-9高强不锈钢弯管 件较佳的管模间隙值。

同时, 部分学者开展了高强 Ti-3Al-2.5V (TA18)导管的数控热绕弯成形研究。黄卫良等^[11] 基于静力隐式和动态显式算法,建立了高强钛管传 热-温热弯曲过程热力耦合三维有限元模型,在 25~400 ℃温度范围内,获得了不同热场条件下高 强钛管数控温热弯曲成形性能。研究发现,管材内 外侧整体升温,能显著降低高强钛管截面扁化、波 纹度和壁厚减薄程度;与整体升温相比,通过控制 内外侧温差变化,波纹度降低了20%,提高了高强 钛管成形性能,获得了能实现小弯曲半径弯曲成形 的合理成形温度区间:100 ℃ $\leq T_{in} \leq 400$ ℃, 150 ℃ ≪ *T*_{out} ≪ 400 ℃。李恒等^[12] 以航空航天用去 应力退火TA18钛管为对象,基于显/隐式结合有 限元算法所建立的钛管数控绕弯回弹全过程有限 元模型,阐明了弹性模量、屈服强度、硬化指数和厚 向异性指数波动下高强钛管回弹的线性和非线性 行为,并与工艺参数对高强钛管数控弯曲回弹的影 响规律进行了对比,进而获得了材料参数波动下高 强钛管回弹对截面扁化的影响规律。梁闯等[13]利 用所建立的TA18高强钛管数控弯曲成形过程三 维有限元模型,系统分析了模具与管材之间的间隙 对TA18高强钛管数控弯曲成形截面畸变和壁厚 变化的影响规律。通过研究发现,减小芯棒/管材 的间隙、弯曲模/管材的间隙和压块/管材的间隙, 可以降低壁厚变化率和截面畸变程度;增加芯棒/ 管材的间隙,可以减小壁厚减薄率;防皱块/管材的 间隙对截面畸变和壁厚变化影响不大。基于有限 元模拟结果,研究人员获得了较佳的芯棒/管材的 间隙值、弯曲模/管材的间隙值、压块/管材的间隙 值和防皱块/管材的间隙值,分别为0.075,0.1,0.1 和 0.1 mm。

目前,在航空导管的数控绕弯成形方面,尚存 在以下几个问题需要进一步研究:(1)对航空导管 的弯曲回弹机理和精确控制需要展开进一步的研 究工作。(2)针对不同材料的变形特征,需要建立 完善的多种航空材料体系的导管塑性力学模型。 (3)目前研究主要集中在形状和尺寸控制方面,在 微观组织的调控方面尚不完善。

1.2 三维导管的自由弯曲成形技术

1.2.1 自由弯曲成形基本原理

三维自由弯曲成形技术原理由日本研究人员 Makoto Murata, Shinji Ohashi, Hideo Suzuki于20 世纪90年代共同提出。图3为三维自由弯曲成形 的基本原理图,从图中可知,自由弯曲装置包括金 属管坯、导向机构、球面轴承、活动弯曲模、送料机 构和推进机构等6个模块^[14]。在金属管坯自由弯 曲成形中,推进机构推动管坯向Z方向运动。当金 属管坯经过活动弯曲模后,X向和Y向的电机根据 前期路径规划,以球面轴承平动带动弯曲模转动, 进而实现弯曲成形过程。整个过程压紧机构始终 压紧管坯,以防翘曲^[15]。





在整个自由弯曲系统中,活动弯曲模中心点和 导向机构中心线在Y轴方向的距离称为偏心距U, 而对于活动弯曲模中心点与导向机构最前端距离 称为成形区长度A。力Pu为活动弯曲模在自由弯 曲过程中对金属管坯的弯曲成形力,方向始终垂直 管坯中心轴线,力PL为推进机构施加给金属管坯 的推进力。整体而言,多个自由弯曲参数之间相互 关联,弯曲成形力Pu和推进力PL都与偏心距U及 成形长度A密切相关,两个力的共同作用下管材 发生弯曲变形,弯矩为

$$M = P_{\rm u} \times A + P_{\rm L} \times U \tag{1}$$

如图4所示,国内外相关学者对三维自由弯曲 技术的研究主要针对圆形截面管材和异形截面管 材而展开。

由于圆管的截面形状相对较为简单,因此基于 圆形管件的自由弯曲技术的研究多集中在突破管 材成形极限、优化工艺参数和提高成形精度等方 面。德国学者提出三维自由弯曲技术特别适用于 单个且有不同弯曲半径的复杂弯曲构件,但目前自 由弯曲机械设备的成形极限最小弯曲半径只有2.5 倍管材外径,无法满足小弯曲半径构件的自由弯曲 成形。Beulich等人^[16]首先在管坯内加入由多段球



图 4 三维自由弯曲成形技术研究现状 Fig.4 Research progress of 3D free bending technology

形节段构成的芯轴,然后建立了六自由度自由弯曲 过程有限元仿真模型,对弯曲过程的关键参数进行 了评估和优化。Hiroyuki等^[17]提出了一种新型柔 性弯曲机构,如图 5(a)所示。该新构型自由弯曲 成形系统的主要特点为弯曲模具的控制方式,在新 型自由弯曲系统中,弯曲模的运动和位置通过四轴 并联机构来确定。如图 5(b)所示,该构型的自由 弯曲成形设备已经应用于实际生产,主要应用于医 疗及建筑艺术领域。2015年,吉林大学李明哲教 授课题组^[18]研发了国内第一台自由弯曲成形设备, 其弯曲模与导向机构无配合连接,应用ABAQUS 有限元仿真软件对基于该结构的管材三维自由弯 曲成形过程进行了有限元模拟,并通过实验获得了 相对弯曲半径低至1.7的碳钢弯管。2017年,南京 航空航天大学郭训忠等^[19-20]针对自由弯曲成形技 术开展了系统研究。通过系统的工艺解析方法,解 析了三轴、五轴和六轴自由弯曲设备全套的工艺解 析方法,掌握了自由弯曲成形的精确控制方法;通 过开展自由弯曲成形数值模拟,掌握了多种材料自 由弯曲成形过程中变形规律;同时开发了系列自由 弯曲成形设备,形成了较为完善的自由弯曲成形系 统,如图6所示。2018年,西北工业大学机电学院 张增坤等人^[21]基于弹塑性力学理论和有限元数值 模拟技术,构建空间管件定心弯扭有限元模型,基 于该模型开展了有限元仿真分析研究,并运用研制 的样机进行了弯曲实验。



(a) 4-axis free bending system(b) Practical application图 5 日本东京工业大学自由弯曲成形系统Fig.5 Free bending forming system developed by Tokyo Institute of Technology

异形截面管材由于截面形状复杂,在弯曲过程 中受力情况较为复杂,国内外相关研究人员基于矩 形截面管材自由弯曲过程中的受力状态进行了分 析。如图7所示,Hudovernik等^[22]开展了统一恒载 条件下高强钢薄壁矩形截面空心构件沿弯曲平面 的不同角度进行自由弯曲时成形特征及机理研究, 通过建立理想悬臂梁模型,采用解析法、数值法和 实验法,得到了高强钢薄壁方形空心构件在不同恒 定曲率、不同弯曲方向下的弯曲成形结果,并与标 准低碳建筑钢薄壁方形空心构件的弯曲成形结果 进行了比较。所提出的方法和研究成果可进一步 用于分析矩形截面空心构件在连续变弯曲方向条



(a) Free bending system for minor diameter tube



(b) Free bending system for large diameter tube



图 6 南京航空航天大学自由弯曲成形系统

Fig.6 Free bending forming system developed by Nanjing University of Aeronautics and Astronautics





件下三维自由弯曲成形特征。

Huang 等^[23]研究了三点弯曲成形时薄壁矩形 截面空心构件局部压痕和弯曲破坏的成形机理,研 究人员通过参数研究,分析了几何参数对截面变形 和作用力的影响,并在分析薄壁矩形截面空心构件 的耗能机理的基础上,建立了薄壁矩形截面空心构 件受力分析模型。Staupendahl等^[24]建立了一个综 合解析模型,系统研究了在弯矩和扭矩共同作用 下,矩形截面空心构件自由弯曲精确成形机理。

国内外对自由弯曲技术的相关研究工作取得 了重要进展,但对于以下问题仍需进一步研究,主 要包括:(1)自由弯曲成形的动态回弹问题,制约了 导管的成形精度。(2)难变形材料的自由弯曲温热 成形尚未系统开展,难变形材料导管的自由弯曲成 形尚处于空白。(3)小弯曲特征或薄壁管的自由弯 曲成形极限尚未有效突破。

1.3 超小弯曲半径导管的充液剪切成形技术

1.3.1 充液剪切成形基本原理

常规弯曲成形工艺过程中,管材外侧受拉、内 侧受压的变形本质决定了其管材成形的相对弯曲 半径存在一定的极限,即相对弯曲半径小于0.5 时,管材外侧有破裂的趋势,而内侧有起皱的趋 势。针对这一问题,哈尔滨工业大学的液力成形中 心提出了充液剪切弯曲的方法:充液剪切弯曲工艺 利用液体介质代替芯轴剪切弯曲中的芯轴作为支 撑,改善弯曲件截面的畸变;以剪切变形代替管材 弯曲过程中的拉压变形来实现材料流动和弯曲;内 部压力在充液剪切弯曲过程中起到重要的作用,合 理的压力范围会有效避免管材在弯曲过程中出现 破裂或起皱等缺陷^[25]。

充液剪切弯曲的工艺示意图如图8所示。主要包括以下几个步骤^[26]:(1)填充与密封。成形前,

将管坯放入下模具中,上模向下运动并限定合模位 置,上下模合模后管材由型腔固定,管材两端安装 有可运动的密封盖,其中一密封盖与压力介质传输 设备相连接,液体介质不断通过管路向管内填充。 同时,外界压力装置提供的轴向推力使两端密封盖 向内推进,完成对管材的密封。(2)初始剪切。充 液完成后,上模在推动设备的作用下以一定速度向 下运动,管材开始发生剪切变形。同时,两端密封 盖由外界压力装置实现进一步的向内推进,以保证 管材变形过程中的横向补料。当管材弯曲变形形 成的弯角与型腔的拐角完全脱离时,管材的剪切变 形达到临界阶段,弯角也是管材受力较为集中的部 位。(3)稳定剪切。临界剪切阶段后,上模进一步 向下运动,两端密封压盖进一步向内运动,管内液 体压力保持稳定,当上模运动到设定位置时,管材 变形完成,上模和两端密封盖停止运动。(4)卸载

开模。管件成形完成后,保持上下模具和两端密封 盖的位置不变,关闭压力介质传输设备的溢流阀, 卸载排液。压力释放后,移出两端密封盖,上模回 位,上下模具开模,取出所成形弯曲管件。



图8 导管充液剪切弯曲工艺示意图

Fig.8 Schematic diagram of hydro-shearing technology

1.3.2 充液剪切成形研究现状

如图9所示,国内外的学者对于充液剪切弯曲 工艺的支撑介质及成形质量影响因素开展了深入 研究。



图 9 导管充液剪切弯曲工艺研究现状 Fig.9 Research progress of hydro-shearing technology

Goodarzi 等[27]采用芯轴支撑与液体支撑进行 比较,利用数值模拟的方法研究了芯轴剪切弯曲过 程中,不同的模具圆角和管材初始壁厚情况下直壁 部分截面畸变的情况;同时进行了Z形管的剪切弯 曲实验,但存在着截面畸变大、易起皱等缺陷。随 着相对弯曲半径的增大和壁厚的提高,截面畸变的 程度都呈下降的趋势。充液剪切弯曲中对管材成 形质量有诸多的影响因素,其中,内压对管材成形 过程中的成形质量、微观组织有较大影响。王勇 等[28]通过实验和数值模拟相结合的方法研究内压 对5A02铝合金充液剪切弯曲管成形缺陷、成形圆 角和轴向壁厚分布的影响,并分析了内压对轴向应 变的影响和厚向应变不变线在成形管件上的分布, 最终得到相对内压大于0.2时,管材能够顺利成 形:韩聪等^[25]采用电子背散射衍射方法研究铝合金 剪切弯曲管的微观组织特征,分析不同内压对外侧 圆角和内侧圆角微观组织的影响,发现剪切变形对 两圆角区域的微观组织有着重要的影响,随着成形 压力的提高,晶粒尺寸逐渐细化。

目前,航空航天导管在强度和刚度要求达到的 前提下,应尽可能趋于轻量化,即在满足工作性能指 标的同时尽量减小重量,减小工作空间。具有小相 对弯曲半径的管材既能提高整体性能,实现结构减 重,又可以有效地节省空间,是非常理想的结构形 式,充液剪切弯曲则是实现这一要求的良好工艺形 式。因此,需要对充液剪切弯曲成形缺陷机制和变 形机理进行深入研究,为小弯曲半径管及超小弯曲 半径管在航空器中的工程应用奠定重要理论基础。

2 多通类导管精确成形技术

多通类导管作为飞机、直升机等航空器排气系统、输油管路系统中重要的分流或结构部件,良好的成形质量和成形精度是保证航空器正常使用的关键。然而,导管在实际工作时,受到的工作压力

频繁发生变化,导管接头处不断受到冲击而发生破 裂^[29]。采用铸造、焊接等传统成形方式加工时,存 在生产效率低、生产成本高、金属损耗大及导管成 形质量及精度低等缺点,已远远无法满足现代航空 业制造需求。随着先进控制技术的快速发展,内高 压成形技术渐渐成为一种灵活可控、安全高效的材 料成形方法^[30],常用来成形常规的多通类的T形 管^[31-33]、Y形管^[34]、X形管^[35]以及异形多通管;当高 效柔性成形短支管多通类零件时,则多采用T-drill 成形技术。

2.1 多通管的内高压成形技术

2.1.1 内高压成形基本原理

内高压成形技术以液体为主要传力介质,模具 型腔内的管坯在内部压力及轴向压力的共同作用 下发生塑性变形,逐步贴模而成形出结构复杂的单 一整体空心构件,可代替传统焊接或铸造工艺,既 节省工序又发挥了材料的最大效能^[36-38]。其具有 以下优点:(1)减少了零件的重量,提高了材料的利 用率^[37-38]。在保证零件使用要求的情况下,可减轻 零件质量 40%~70%,提高材料利用率 30%~ 50%。(2)成形工序少,模具数量少,效率高,成本低^[39]。内高压成形工艺基本属于一次成形,极大地减少了生产用模具的数量。液压成形工艺与传统冲压工艺相比,加工成本平均降低15%~20%,模具费用平均减少20%~30%。(3)加工道次少,成形质量高。在内高压成形过程中,通过轴向补料,可以改善管坯的应力应变状态,显著增加其塑性变形能力。对于复杂形状零件,也可以一次成形,减少加工道次。并且由于内高压成形为整体成形,因此大多数内高压成形零件不需要焊接,从而降低甚至消除了焊接变形对零件精度的影响,显著提高零件刚度及强度。

内高压成形的基本原理如图 10 所示。首先将 管坯放入模具型腔中,然后控制液压系统完成合 模。向型腔中充入介质后,两水平冲头及塞头同时 运动,不断增加管坯内部压力。管坯在内压力及轴 向力的共同作用下,管坯不断变形,最终与模具型 腔内壁紧密贴合,得到符合要求的零件。成形结束 后取出零件,合模缸、进给缸泄压返回,整个内高压 成形结束。



Fig.10 Schematic diagram of hydroforming

2.1.2 内高压成形研究现状

如图 11 所示,国内外已经在不同类型多通类 导管内高压成形基本理论及工艺优化等方面取得 了重要进展^[40]。

肖尧^[41]系统研究了压力加载路径、补料比、摩 擦因数及下料方式对 5A02 铝合金 Y 形三通管壁 厚分布及成形质量的影响规律,并进行正交试验, 优化了各影响因素。丁露露等^[42]则基于有限元软 件 ANSYS 对非对称 Y 形管内高压成形模具进行 了优化设计。朱书建等^[43]针对 T 形三通管内高压 成形过程中易出现的破裂和起皱等问题,以最小壁 厚与胀形高度等关键参数为管件成形质量的评价 指标,采用正交试验法对T形三通管的加载路径 进行优化,提出所选工艺参数范围内的最优加载路 径,并通过实验验证了基于数值仿真与正交试验法 获取加载路径的可行性与正确性。为减小T形管 在弯内高压成形时的缺陷,Xu等^[44]提出了一种新 的区域润滑方法,可显著提高成形质量。

航空多通管一般为薄壁或超薄壁零件,成形缺 陷较多,起皱和破裂控制难以实现。因此,在航空 多通类零件先进成形技术方面还需要更加深入的 研究,亟待开展的关键技术主要包括:复合多通管 内高压成形技术、热力场耦合条件下的内高压成形 技术以及超低温内高压成形技术研究等。



图11 管材内高压成形工艺研究现状 Fig.11 Research progress of hydroforming

2.2 多通管的 T-drill 成形技术

2.2.1 T-drill成形基本原理

T-drill成形技术是 20 世纪后期发展起来的 一种数字化柔性制造技术,T-drill成形在加工过 程中,无须辅助模具,只使用工具头对工件进行 塑性加工,在成形管端扩口、缩口、翻边以及成形 三通管方面具有明显的优势。传统工艺成形这 些零件主要通过挤压、胀形或铸造等方法制造, 具有一定的局限性,而T-drill成形相对于其他成 形工艺,成形工艺灵活,可以进行不同尺寸以及 形状复杂的零件,应用范围广^[45-46]。T-drill成形装 置如图 12 所示。在成形过程中,将管坯一端或两 端用夹具固定,预留成形位置,工具头被夹持在 成形机床的主轴上,工具头表面和待成形的部分 均涂有润滑油,在主轴的转动下,工具头对待成 形的部分进行成形加工。工具头如图12(b)所示, 它有3个组成部分:夹持区域、成形区域和整形区 域。夹持区域由一个圆柱体组成,可将工具头夹 持到成形机床主轴上;成形区域为一个圆锥台, 圆锥台的上部直径与成形区域圆柱体直径相同, 其作用是将预制孔一周管壁从水平状态预翻成 倾斜状态;整形区域为位于圆锥台下方的圆柱 体,其目的是将已经预翻起一定角度的管壁整形 至竖直状态^[47-48]。



Fig.12 Forming device of T-drill

2.2.2 T-drill成形研究现状

T-drill成形技术发展历程如图 13 所示,国内 外众多学者对 T-drill成形技术不断进行开发优 化,目前已广泛应用于管材成形塑性成形领 域中。

Teramae 等^[47]首次提出了 T-drill 成形技术, 并成形试制出不同直径、不同形状的管壁连接部 分,通过有限元模拟与成形试验相结合的方法, 研究了材料的各种性能如加工硬化系数和材料 各向异性等对加工过程中管壁变形行为的影响。 温形等^[48]则利用 T-drill 成形技术加工出短支管多 通类零件,并对成形过程中管材的变形行为进行 了表征。众多学者对 T-drill 成形技术不断进行开 发优化,提高了 T-drill 成形技术的应用范围。杨



图 13 T-drill成形工艺研究现状 Fig.13 Research progress of T-drill

臣等^[45-46]基于 Teramae 的 T-drill 成形工艺,开发了 一种新型的管材 T-drill 成形工艺,可用于管端扩 (缩)口、管端翻卷、管壁翻孔和管壁压槽几种代表 性的管件的精确成形。研究人员根据典型管件的 几何与成形工艺特征,分析了不同材料和尺寸管坯 的成形特点,设计出相应的工具头和夹具,然后开 展了管件 T-drill 成形过程有限元模拟与实验研究, 系统分析了工艺参数对成形过程的影响。Rauiol-Veillé等^[49]开发了一种用于新型薄壁短管翻边 的 T-drill 成形工艺,该工艺将薄壁短管一端通过夹 具夹紧并随着夹具以一定转速旋转,另一端自由, 滚轮在成形过程中对薄壁短管做径向进给同时以 与工件旋转方向相反的方向进行转动,使薄壁短管 的边缘产生向外的塑性变形,通过控制滚轮径向进 给量的大小,可改变薄壁管材翻边的长度和位置, 改变滚轮转速和薄壁短管转速之比,即可成形出不 同质量的翻边制件。研究人员采用有限元模拟与 成形试验相结合的方法,分析了在成形过程中短管 的应力应变状态,并系统研究了成形工艺参数对残 余应力与回弹的影响。Grzancic等^[50-51]采用3个成 形工具头对管坯进行成形,在成形过程中,根据特 定的轨迹沿着管坯的轴向和径向方向进给,成形出 不同形状的管材,并对成形工艺进行了分析,研究 了工具头的进给尺寸和管子尺寸对成形力的影 响。Nazari等^[52]系统研究了滚轮产生的径向和周 向叠加应力对弯矩的影响,通过解析模型计算出的 回弹结果与实验结果基本一致,对试验材料的回弹 率偏差仅为5%。

T-drill成形工艺虽然具有加工工艺简单、工艺 灵活、生产成本低等优点,但其也有一定的局限 性。在成形过程中,由于成形是逐步成形,故单次 成形时间较长,成形效率低下;按照正弦规律分布, 不能一次成形直壁件,需要多道次加工,故成形过 程耗时较多;因工件的回弹变形较大,即使进行工 艺路线补偿,也无法完全消除尺寸偏差。由于 T-drill成形工艺具有一定的局限性,因此各国的学 者们在今后的研究方向将致力于提高T-drill成形 技术的加工效率、成形精度和成形件的质量。

3 总结与展望

高性能导管在航空器中具有极为重要的作用, 主要承担燃油输送、滑油运输、空气传递以及集束 电气等任务,任一系统中管路出现破裂或者失效, 都将对航空器运行造成严重影响。航空器管路系 统空间布局复杂,相互交织,并且管路构件常在高 压、强振动的苛刻条件下工作,对管路系统的设计 与精确成形、管路的承压能力与传输效率均提出了 很高的要求。为进一步提高成形质量及成形效率, 满足对导管的实际需求,不同类型的导管需选择对 应且合理的加工方式,如规则导管采用数控绕弯成 形技术进行加工成形;三维复杂空间导管采用自由 弯曲成形技术可显著提高成形效率,降低成本;充 液剪切成形技术则可实现超小弯曲半径导管精确 成形;对于常规的多通类的T形管、Y形管、X形管 以及异形多通管等,采用内高压成形技术可实现精 确成形;当高效柔性成形短支管多通类零件时,则 第1期

多采用 T-drill 成形技术。

在科研学者的共同努力下,目前已经在上述成 形技术基本成形理论及工艺优化等方面取得了创 新性成果。但也应当看出,在快速发展的同时,目 前仍需要在成形过程中金属流动规律及变形特征、 有限元仿真模型精确构建、工艺优化及成形缺陷预 测与调控、先进成形装备研发及升级等方面继续开 展深入研究。其中,以铝、镁、钛等轻合金为加工对 象的热成形、双多层复合管精确成形及成形工艺的 数字化将是重要研究内容。

参考文献:

- [1] 郭训忠,徐勇,陶杰,等.金属空心构件先进冷成形 技术[M].北京:科学出版社,2018.
- [2] 韩志仁,吕彦盈,刘宝明,等.飞机焊接导管数字化 制造技术研究[J].航空制造技术,2017,527(8): 95-98.

HAN Zhiren, LVY Yanying, LIU Baoming, et al. Research on the digital manufacturing technology of aircraft welding tube [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 527(8): 95-98.

- [3] 白雪山.导管数字化制造技术在某新型飞机研制中的应用[J].航空制造技术,2014,458(14):83-85.
 BAI Xueshan. Application of tube digital manufacturing technology on a new type of plane[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 458 (14):83-85.
- [4] 罗敏.航空发动机外部管路工装数字化设计[J].航空制造技术,2015,485(15):8-21.
 LUO Min. Tooling digital design of aeroengine external pipeline[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015,485(15):8-21.
- [5] 杨合.局部加载控制不均匀p与精确塑性成形:原理 和技术[M].北京:科学出版社,2014.
- [6] ZHAN Mei, WANG Yan, YANG He, et al. An analytic model for tube bending springback considering differentparameter variations of Ti-alloy tubes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 236: 123-137.
- [7] ZHAN Mei, HUANG Tao, ZHANG Peipei, et al. Variation of Young's modulus of high-strength TA18 tubes and its effects on forming quality of tubes by numerical control bending [J]. Materials and Design, 2014, 53(3): 809-815.
- [8] ZHAO Gangyao, LIU Yuli. Analysis of wrinkling limit of rotary-draw bending process for thin-walled rectangular tube[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(9): 1224-1231.
- [9] 唐金星.多模具约束下管材数控弯曲成形数值模拟 研究[D].南昌:南昌航空大学,2015.

TANG Jinxing. Numerical simulation study of tube NC bending forming under mulit-die constraints [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2015.

- [10] 方军,鲁世强,王克鲁,等.管模间隙对21-6-9高强 不锈钢管数控绕弯成形质量的影响[J].北京理工大 学学报,2015,35(9):886-891.
 FANG Jun, LU Shiqiang, WANG Kelu, et al. Effect of clearance between tube and dies on forming quality in NC bending process of high strength 21-6-9 stainless steel tube[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2015, 35(9); 886-891.
- [11] 黄卫良,李恒,马俊,等.高强Ti-3Al-2.5V 钛管温热 弯曲性能仿真研究[C]//第十五届全国塑性工程学 会年会暨第七届全球华人塑性加工技术交流会.济 南:全国塑性工程学会,2017:430-434. HUANG Weiliang, LI Heng, MA Jun, et al. Simula-

tion study on thermal bending properties of high strength Ti-3Al-2.5V titanium tube[C]//Proceedings of the 15th Annual Conference of the National Society of Plastic Engineering and the 7th Global Chinese Plastic Processing Technology Exchange. Jinan: the National Society of Plastic Engineering, 2017: 430-434.

[12] 李恒,杨合,宋飞飞,等.材料性能波动下TA18钛
 管绕弯回弹行为[J].稀有金属材料与工程,2014,43
 (1):64-71.
 LI Heng, YANG He, SONG Feifei, et al. Spring-

back rules of TA18 titanium tube upon rotary draw bending under variations of material properties [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(1): 64-71.

 [13]梁闯,鲁世强,方军,等.间隙对TA18高强钛管数 控弯曲成形截面畸变及壁厚变化的影响[J].塑性工 程学报,2017,24(6):93-99.

LIANG Chuang, LU Shiqiang, FANG Jun, et al. Effect of clearance on cross section deformation and wall thickness variation of TA18 high strength titanium tube in NC bending[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24(6): 93-99.

- [14] LI Pengfei, WANG Liyan, LI Mingzhe. Flexible-bending of profiles and tubes of continuous varying radii[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88 (5/6/7/8) : 1669-1675.
- [15] 熊昊,马燕楠,周曙君,等.三维复杂轴线空心构件
 自由弯曲成形技术研究[J].塑性工程学报,2018,25
 (1):100-110.

XIONG Hao, MA Yannan, ZHOU Shujun, et al. Free bending forming technology of three dimensional complex axis hollow component[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25(1): 100-110.

[16] BEULICH N, CRAIGHERO P, VOLK W. FEA

simulation of free-bending—A preforming step in the hydroforming process chain [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 896(1): 12-20.

- [17] HAYASHI S, MATSUURA D, SUGAHARA Y, et al. A motion generation method of a pipe bender using a parallel mechanism to fabricate welfare devices in complicated 3-D shapes [C]//Proceedings of Annual Conference 2016: General Association of Mechanical Engineering. [S.I.]: [s.n.], 2016.
- [18] LI Pengfei, WANG Liyan, LI Mingzhe. Flexible-bending of profiles with asymmetric cross-section and elimination of side bending defect[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(9/10/11/12): 2853-2859.
- [19] GUO Xunzhong, XIONG Hao, LI Heng, et al. Forming characteristics of tube free-bending with small bending radii based on a new spherical connection [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 133(5): 72-84.
- [20] 郭训忠,马燕楠,徐勇,等.三维自由弯曲成形技术 及在航空制造业中的潜在应用[J].航空制造技术, 2016,518(23):16-24.

GUO Xunzhong, MA Yannan, XU Yong, et al. State-of-the-arts in 3D free bending technology and the future application in aviation manufacture[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 518 (23) : 16-24.

[21] 张增坤,吴建军,尚琪,等.空间管件弯扭组合加载 成形及回弹规律研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61 (16): 22-27.

ZHANG Zengkun, WU Jianjun, SHANG Qi, et al. Investigation to forming and spring back of spatial tubes in bending-twisting process [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(16): 22-27.

- [22] HUDOVERNIK M, KOSEL F, STAUPENDAHL D, et al. Application of the bending theory on square-hollow sections made from high-strength steel with a changing angle of the bending plane[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(11): 2505-2513.
- [23] HUANG Zhixin, ZHANG Xiong. Three-point bending of thin-walled rectangular section tubes with indentation mode[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 137: 231-250.
- [24] STAUPENDAHL D, TEKKAYA A E. Mechanics of the reciprocal effects of bending and torsion during 3D bending of profiles [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 262: 650-659.
- [25] HAN Cong, WANG Yong, XU Yongchao. Effect of internal pressure on microstructure of tube shear hydro-bending of 5A02 aluminum alloys[J]. Transctions

of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21: 429-433.

- [26] 王勇.管材充液剪切弯曲成形规律研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
 WANG Yong. Research on forming laws of tube shear hydro-bending[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [27] GOODARZI M, KUBOKI T, MURATA M. Effect of initial thickness on shear bending process of circular tubes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 191(1): 136-140.
- [28] WANG Yong, HAN Cong. Effect of internal pressure on corner radius and thickness distribution of shear hydro-bending of 5A02 aluminum alloy tube[J]. Transctions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22 (22): 376-381.
- [29] GUO Xunzhong, LIU Hongbing, CUI Shengqiang, et al. Investigation on the maximum thinning and protrusion height of the hydroformed 316L SS/Al clad T-branch [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73 (5/6/7/8) : 727-733.
- [30] GUO Xunzhong, LIU Zhongli, WANG Hui, et al. Hydroforming simulation and experiment of clad T-shapes [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83 (1/2/3/4) : 381-387.
- [31] 朱明清,吉卫喜,张旭,等.钛T型管液压成形的工艺参数研究[J].锻压技术,2015,40(1):56-60.
 ZHU Mingqing, JI Weixi, ZHANG Xu, et al. Study on technological parameters of titanium T-shaped tube hydroforming[J]. Forming & Stamping Technology, 2015,40(1):56-60.
- [32] 戴龙飞,徐雪峰,孙前江,等.摩擦系数对薄壁T型 管内高压成形的影响[J].锻压技术,2018,43(7): 159-164.

DAI Longfei, XU Xuefeng, SUN Qianjiang, et al. Effect of friction coefficient on internal high pressure forming in thin-wall T-shaped tube [J]. Forming &. Stamping Technology, 2018, 43(7): 159-164.

- [33] XU Xuefeng. A novel lubrication method for hydroforming of thin-walled aluminum alloy T-shaped tube
 [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102(5/6/7/8): 2265-2273.
- [34] LEE M, KORKOLIS Y, KIM J. Recent developments in hydroforming technology [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2015, 229 (4) : 572-596.
- [35] YUAN Shijian, CUI Xiaolei, WANG Xiaosong. Investigation into wrinkling behavior of thin-walled

5A02 aluminum alloy tubes under internal and external pressure [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2015, 92: 245-258.

- [36] MIRZAEI M, NAJAFI M, NIASARI H. Experimental and numerical analysis of dynamic rupture of steel pipes under internal high-speed moving pressures [J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 85: 27-36.
- [37] SHINDE R A, PATIL B T, JOSHI K N. Optimization of tube hydroforming process (without axial feed) by using FEA simulations [J]. Procedia Technology, 2016, 23: 398-405.
- [38] YANG Lianfa, HU Guolin, LIU Jianwei. Investigation of forming limit diagram for tube hydroforming considering effect of changing strain path[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(5/6/7/8): 793-803.
- [39] 董楹,黑东盛,白艳.管材轴向压力内高压胀形数值 分析及验证[J]. 航空制造技术,2018,61(18): 60-66.

DONG Ying, HEI Dongsheng, BAI Yan. Numerical analysis and verification of tube internal high pressure forming under axial pressure [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(18): 60-66.

- [40] 韩雪.多通管内高压成形系统的研究与设计[D].沈阳:东北大学,2015.
 HAN Xue. Research and design of multiway pipe internal high pressure forming system [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [41] 肖尧.Y型管内高压成形影响因素研究及壁厚分布优 化[D].南昌:南昌航空大学,2019. XIAO Yao. Study on the influence factors of hydroforming of Y-shaped tube and thickness distribution optimization [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2019.
- [42] 丁露露,成小乐,刘劼,等.非对称Y型管内高压成 形模具设计[J].西安工程大学学报,2019,31(6): 655-659.
 DING Lulu, CHENG Xiaole, LIU Jie, et al. The mould design of asymmetrical Y-shape pipe hydro forming[J]. Journal of Xi' an Polytechnic University,

2019, 31(6): 655-659.

[43] 朱书建,李健,林贤坤,等.基于正交试验法的T型
 三通管内高压成形仿真与优化[J].锻压技术,2018,43(9):75-82.
 ZHU Shujian, LI Jian, LIN Xiankun, et al. Simu-

lation and optimization on hydroforming of T-shape tube based on orthogonal experiment[J]. Forming &. Stamping Technology, 2018, 43(9): 75-82.

- [44] XU Xuefeng, WU Kongwei, WU Yiwang, et al. A novel lubrication method for hydroforming of thin-walled aluminum alloy T-shaped tube[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102(5/6/7/8): 2265-2273.
- [45]杨臣.管件无模渐进成形技术研究[D].重庆:重庆 大学,2015.
 YANG Chen. Study on dieless incremental forming technology of tube[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [46] YANG Chen, WEN Tong. Dieless incremental hole-flanging of thin-walled tube for producing branched tubing [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(11): 2461-2467.
- [47] TERAMAE T, MANABE K, UENO K, et al. Effect of material properties on deformation behavior in incremental tube-burring process using a bar tool[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 191(1/2/3): 24-29.
- [48] WEN Tong, YANG Chen, ZHANG Suo, et al. Characterization of deformation behavior of thin-walled tubes during incremental forming: A study with selected examples [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(9/ 10/11/12): 1769-1780.
- [49] RAUJOL-VEILLÉ J, TOUSSAINT F, TABOUR-OT L, et al. Experimental and numerical investigation of a short, thin-walled steel tube incremental forming process [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2015, 19: 59-66.
- [50] GRZANCIC G, BECKER C, KHALIFA N B. Basic analysis of the incremental profile forming process[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2016, 138(9): 1-6.
- [51] GRZANCIC G, LOBBE C, KHALIFA N B, et al. Analytical prediction of wall thickness reduction and forming forces during the radial indentation process in incremental profile forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 267: 68-79.
- [52] NAZARI E, STAUPENDAHLL D, LOBBE C, et al. Bending moment in incremental tube forming [J]. International Journal of Material Forming, 2019, 12 (1): 113-122.

(编辑:胥橙庭)