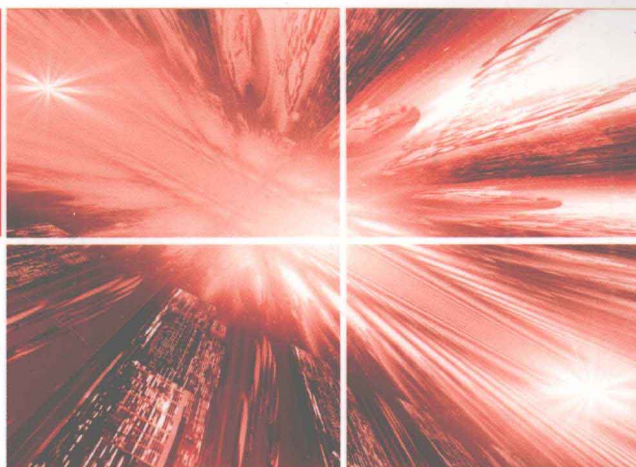


普通高等教育“十二五”规划教材



# 板料数控渐进 成形技术

高锦张 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

# 板料数控渐进成形技术

高锦张 编 著  
高 霖 主 审



机械工业出版社

本书系统地介绍了板料数控渐进成形技术的特点、分类、成形机理、成形过程影响因素、成形缺陷与控制、成形设备等内容,详细阐述了板料数控渐进成形锥、台、半球、筒、盒等典型制件的过程,给出了板料数控渐进成形的试验分析方法和有限元模拟技术,并简要介绍了板料数控渐进成形工艺所涉及的数控技术、材料力学性能参数的测定等应用基础。

本书可作为高等学校机械类、材料成形类专业本科生、研究生教材,也可供从事机械类、模具技术类及金属塑性成形生产与科研工作的工程技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

板料数控渐进成形技术/高锦张编著. —北京:机械工业出版社, 2011. 10

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-35724-7

I. ①板… II. ①高… III. ①板材冲压—成型—数控技术—高等学校—教材 IV. ①TG386. 41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 175596 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 余 焯 责任编辑: 余 焯 韩旭东

版式设计: 霍永明 责任校对: 张 媛 责任印制: 乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2012 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 12 印张 · 292 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-35724-7

定价: 28.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销 售 一 部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销 售 二 部: (010) 88379649

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

# 前言

20 世纪 90 年代初,日本学者松原茂夫提出了一种新型的板料成形技术——板料数控渐进成形技术,该技术是在当今市场向多元化、个性化方向发展的背景下诞生的,是适用于零件单件或小批量生产的一种柔性加工方法。板料数控渐进成形技术作为刚刚兴起的一种柔性加工成形技术,将快速原型制造技术和塑性成形技术有机结合,是涉及力学、塑性成形技术、数控技术、CAD/CAM 等多学科的先进智能化制造技术。板料数控渐进成形技术无需专用模具或采用简单模具,即可以成形出具有复杂曲面形状的制件,能提高板料成形极限,易于实现板料成形的自动化;此外,由于板料数控渐进成形技术采用分层逐点局部成形方式,所需成形力小,设备能耗低,因此属于绿色加工。鉴于技术的诸多优点,引起了世界各国学者的高度重视,并进行了深入研究。

板料数控渐进成形技术作为目前塑性加工领域的研究前沿之一,至今尚无系统地介绍该技术的资料,为了促进板料数控渐进成形技术的发展,使该技术能进一步应用于生产实践,作者根据自己多年来从事板料数控渐进成形技术研究与教学工作中积累的具有重要价值的研究成果和经验,以及所能收集到的国内外关于板料数控渐进成形技术发展及应用现状的相关资料,编著了本书。

本书共分 7 章。第 1 章概述,介绍了板料数控渐进成形技术的现状、特点、应用以及发展趋势;第 2 章板料数控渐进成形工艺,阐述了板料数控渐进成形工艺的分类、影响因素、成形缺陷与控制、成形道次规划及运动轨迹的生成、成形工艺装备等,并介绍了相关的数控加工基础知识,给出了运动轨迹生成实例;第 3 章板料数控渐进成形机理,分析了板料数控渐进成形工艺的成形原理、制件壁厚变化规律,并给出了力能计算方法;第 4 章板料数控渐进成形试验分析方法,叙述了板料数控渐进成形工艺的物理试验分析方法;第 5 章板料数控渐进成形的有限元模拟技术,介绍了有限元技术的发展及在板料成形中的应用,构建了板料渐进成形工艺的有限元模型,并给出了应用实例及建模所需的材料参数测定方法;第 6 章板料数控渐进成形典型制件,阐述了锥、台、半球、筒、盒等典型制件的成形路径设计、变形规律及壁厚分布,给出了成形路径设计的基本原则,并介绍了汽车翼子板及雕塑像的成形;第 7 章板料数控渐进成形设备简介,叙述了板料数控渐进成形工艺对成形设备的要求,介绍了常用的数控渐进成形设备。

本书由东南大学高锦张编著,特别邀请南京航空航天大学高霖教授担任主审,获东南大学科技出版基金资助。在本书编著过程中得到东南大学材料加工工程教研室诸位老师,南京工程学院顾雪艳老师、赵利群老师以及南京交通职业技术学院贾俐俐老师的大力支持和帮助;此外,东南大学的郑勇、王书鹏、邵兴彬、蒋松、沈黎萍、徐梁、肖士昌、王洋等研究生参与了本书部分内容的研究和资料的整理工作,徐梁和蒋松还协助进行了书稿的编著工作,在此一并表示衷心的感谢。在书籍的编著过程中,研究参考了国内外很多学术文章和著作,在这里也向相关研究单位和个人表示诚挚感谢。

由于板料数控渐进成形技术处于发展阶段，涉及内容十分广泛，再加之作者学术水平、实践经验所限，书中内容难免存在疏漏欠妥之处，敬请读者提出宝贵意见。

作 者

# 目 录

## 前言

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| <b>第 1 章 概述</b>               | 1   |
| 1.1 板料数控渐进成形技术的发展             | 1   |
| 1.2 板料数控渐进成形工艺特点              | 3   |
| 1.3 板料数控渐进成形技术的应用             | 10  |
| 1.4 板料数控渐进成形技术的发展趋势           | 14  |
| <b>第 2 章 板料数控渐进成形工艺</b>       | 16  |
| 2.1 板料数控渐进成形工艺分类              | 16  |
| 2.2 板料数控渐进成形工艺的影响因素           | 21  |
| 2.3 板料数控渐进成形缺陷与控制             | 24  |
| 2.4 板料数控渐进成形道次规划及成形工具运动轨迹     | 29  |
| 2.5 成形工艺装备                    | 32  |
| 2.6 板料数控渐进成形的坯料               | 37  |
| 2.7 数控加工基础                    | 37  |
| <b>第 3 章 板料数控渐进成形机理</b>       | 51  |
| 3.1 板料数控渐进成形原理                | 51  |
| 3.2 成形制件壁厚变化规律                | 52  |
| 3.3 板料数控渐进成形中应变的分析            | 54  |
| 3.4 板料数控渐进成形中应力的分析            | 59  |
| 3.5 板料数控渐进成形中变形力的计算实例         | 61  |
| 3.6 板料数控渐进成形的控制原则             | 64  |
| <b>第 4 章 板料数控渐进成形试验分析方法</b>   | 66  |
| 4.1 坐标网格技术与成形极限图              | 66  |
| 4.2 金相组织分析法                   | 74  |
| <b>第 5 章 板料数控渐进成形的有限元模拟技术</b> | 78  |
| 5.1 有限元模拟技术发展概述               | 78  |
| 5.2 板料成形有限元模拟技术               | 79  |
| 5.3 板料数控渐进成形有限元模拟             | 86  |
| 5.4 有限元模拟技术应用实例               | 101 |
| 5.5 ANSYS/LS-DYNA 的 K 文件      | 111 |
| 5.6 材料力学性能参数的测定实例             | 116 |
| <b>第 6 章 板料数控渐进成形典型制件</b>     | 120 |
| 6.1 板料数控渐进成形锥形件               | 121 |
| 6.2 板料数控渐进成形锥台件               | 128 |
| 6.3 板料数控渐进成形半球形件              | 130 |
| 6.4 板料数控渐进成形直壁圆筒件             | 134 |

---

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 6.5 板料数控渐进成形盒形件 .....         | 144        |
| 6.6 板料数控渐进成形复杂形状制件 .....      | 152        |
| 6.7 板料数控渐进成形的路径缩放研究 .....     | 159        |
| <b>第7章 板料数控渐进成形设备简介 .....</b> | <b>161</b> |
| 7.1 数控机床的机械结构及控制系统 .....      | 161        |
| 7.2 板料数控渐进成形工艺对设备的要求 .....    | 166        |
| 7.3 数控渐进成形机 .....             | 167        |
| <b>参考文献 .....</b>             | <b>176</b> |

# 第 1 章 概 述

薄板、薄壁管、薄壁型材等薄壁金属可以统称为板金材料，简称板料或板材。以板料为原材料加工成的各种零件在航空航天、汽车机车、电机电器、食品包装、日用五金等工业部门都获得了广泛应用。而板料生产企业以及板料加工企业，已是我国国民经济中十分重要的生产部门。

## 1.1 板料数控渐进成形技术的发展

金属板料成形在制造业中有着广泛应用，板料成形又称为冲压成形，按变形性质可分为分离工序和成形工序。分离工序是利用冲模在压力机外力的作用下，使板料分离出一定形状和尺寸的工件的冲压工序，它包括落料、冲孔、切断、切边、剖切等工序。成形工序是利用冲模在压力机外力的作用下，使板料产生塑性变形而得到要求的形状和尺寸的工件的冲压工序，它包括拉深、弯曲、翻边、胀形、旋压等工序。

传统的冲压工艺必须使用模具，因而生产周期长，费用高，难以适应小批量、多品种和样品试制的生产模式。以汽车行业为例，每年国际上都有大批新车型上市，而在新车型开发中很重要的一环是覆盖件模具的设计和制造，需要经过模具设计、软模制造、试验修改、硬模制造等复杂过程才能投入生产，其试制过程耗时、耗资、耗力，从而使新车型的开发周期长，成本高，投资风险大。因此，有学者对金属板料无模成形技术进行了探索研究。常见的板料无模成形技术主要包括：喷丸成形、成形锤成形、多点成形、激光成形、旋压成形等。鉴于上述无模成形技术的优点与不足，人们仍不断地对新的板料成形技术进行探索研究。

20 世纪 90 年代初，日本学者松原茂夫提出了一种新型的金属板料成形技术——板料数控渐进成形技术。该技术是在当今市场向多元化、个性化方向发展的背景下诞生的，是适用于零件单件或小批量生产的一种柔性加工方法。在批量生产向个性化生产转变的今天，产品的小批量、多样化发展趋势演变成一种新的经济形势——小批量、多品种的灵活市场经济形势。为了适应这种灵活的市场需求，必须构筑如板料数控渐进成形技术等柔性加工系统。

板料数控渐进成形技术是国际上刚刚兴起的一种柔性加工成形技术，它将快速原型制造技术和塑性成形技术有机结合，是涉及力学、塑性成形技术、数控技术、CAD/CAM 等多学科的先进智能化制造技术，是目前塑性加工领域的研究前沿之一，在加工理论研究上也具有重要的意义，得到了世界范围内塑性加工学者的关注。该技术显著的优点是作为一种柔性加工技术，无需使用专用模具或仅需要简单的模具，即可以在局部区域内成形出常规成形方法无法成形的复杂曲面形状；同时，由于局部成形所需要的成形力小，设备能耗低，所以属于绿色加工。现在，日本、韩国、意大利、法国、加拿大、斯洛文尼亚、比利时、德国、英国等国的学者已对该技术及应用做了大量的研究工作，而国内虽然对这种新兴的加工技术研究起步较晚，但也取得了大量研究成果。

板料数控渐进成形技术引入快速原型制造技术（Rapid Prototyping）中分层制造（Lay-



ered Manufacturing) 的思想, 将复杂的三维数字模型沿高度方向离散成许多断面层 (即分解成一系列等高线层), 并生成各断面层上的加工轨迹, 成形工具在计算机控制下沿加工轨迹运动, 使板料沿成形工具的轨迹包络面逐次成形, 即以成形工具的运动轨迹所形成的包络面来代替模具的型面, 以对板料进行逐次局部变形代替整体变形, 最终将板料成形为目标制件。

板料数控渐进成形工艺成形过程如下: ①产品成形分析, 依据产品特点判断能否采用板料数控渐进成形技术进行加工, 经判断若不适合采用该技术成形, 则选用其他成形技术加工, 若适合则进入第二步流程; ②产品结构设计, 在计算机上用三维 CAD 软件建立目标制件的三维数字模型; ③成形工艺设计, 进行成形工艺分析、工艺规划, 制造工艺辅助装置; ④数控程序编制, 对三维模型进行分层处理, 并进行路径规划, 设计成形轨迹, 生成 NC 代码; ⑤机床加工成形, 将 NC 代码输入计算机, 控制专用成形设备成形目标制件并对成形制件进行后续处理, 得到最终产品; ⑥制件质量检验, 依据产品的质量要求, 利用各种检测手段, 对成形出的目标制件进行检测, 若产品满足要求, 制件成形结束; 若产品不符合要求, 则重新从流程③开始, 进行成形工艺设计, 如此循环。其工艺流程简图如图 1-1 所示。

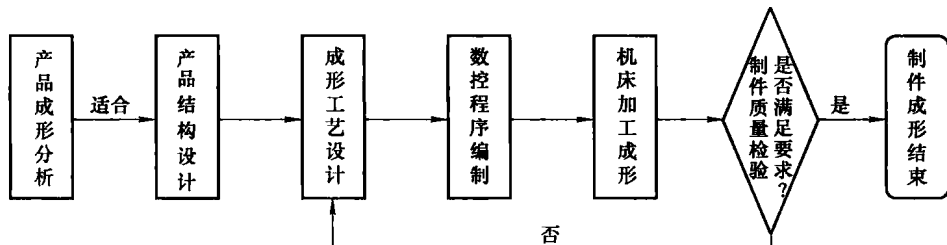


图 1-1 板料数控渐进成形工艺流程

在板料数控渐进成形技术提出的初期, 主要研究对象集中在一些简单的轴对称零件上, 如锥形件、圆台件、半球形件等。通过对这些典型的简单零件的成形, 研究成形过程中金属的塑性流动规律, 以及成形过程中主要的影响因素, 如成形工具直径、轴向进给量、成形工具转速、成形角等, 并对成形路径的设计原则进行探索。采用的研究方法主要是物理实验分析: 在板料表面印制坐标网格, 通过测量坐标网格随板料变形而变化的网格尺寸并计算, 可以获得有关板料应力和应变的大小、分布等重要信息, 从而研究板料毛坯的变形状态、变形路径、破坏时的极限应变变量、破裂、起皱等。

板料渐进成形过程是一复杂的物理过程, 涉及力学中的三大非线性问题, 即几何非线性 (大位移、大变形)、材料非线性 (弹塑性、弹粘性、各向异性)、状态非线性 (接触和摩擦), 因此用传统弹塑性理论的解析法难以进一步探索研究。进入 21 世纪, 随着数值模拟技术的不断成熟和计算机软硬件技术的高速发展, 基于有限元方法的计算机仿真技术在板料渐进成形领域得到了广泛应用。通过数值模拟方法来获得金属成形过程中的应力、应变、金属的流动情况等难以通过实验得到的数据是一种有效的研究手段, 目前常用的有限元分析平台有 ANSYS/LS-DYNA、ABAQUS 等。随着数值模拟技术的引入, 板料数控渐进成形工艺流程发生了变化, 如图 1-2 所示。随着板料数控渐进成形技术研究方法的进步, 成形过程中一些物理量变化的可视化, 使研究取得了一定进展。从研究对象来看, 已从最初的简单旋转类零件发展为较难成形的零件, 如直壁类零件、汽车覆盖件等。成形设备的开发研制也随之发展, 从先前主要的成形设备是将数控铣床通过一定的改造而成, 到目前专用的板料数控渐进

成形机,日本 AMINO 公司制造了专用的数控渐进成形机,并实现了设备的系列化生产。国内第一台数控渐进成形机是由华中科技大学与黄石锻压机床有限公司合作研制的,并开发了相应的系统控制软件,该设备的最大加工范围为  $800\text{mm} \times 500\text{mm} \times 300\text{mm}$ ,通过一系列的工艺实验及汽车覆盖件的产品试制,取得了良好的效果。目前国外已经开展利用机械手进行数控渐进成形的研究,相比常规渐进成形设备,其成形工具拥有更大的自由度,可以进行形状更复杂的零件成形。

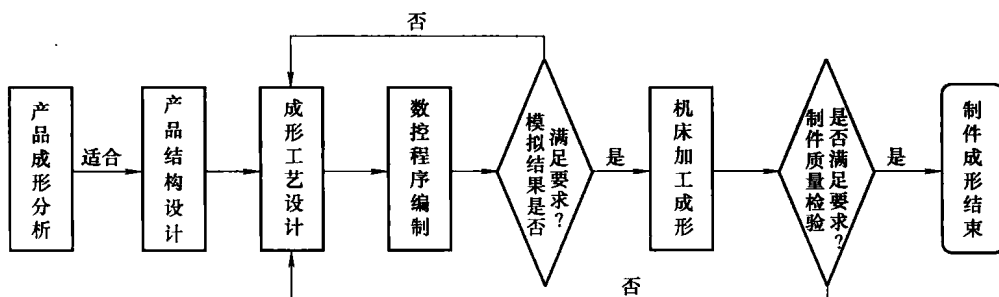


图 1-2 新的板料数控渐进成形工艺流程

板料数控渐进成形技术作为一种新型的柔性成形加工工艺,在制造业中得到广泛的应用,显示出该技术具有广阔的应用前景和巨大的开发潜力。板料数控渐进成形工艺已在医学、汽车制造业、新品试制、民用工业等方面应用。以汽车制造业为例,日本本田汽车公司已经利用板料数控渐进成形技术进行了 Fit HB 型概念车覆盖件的成形加工,并已投入设计生产;在 2005 年东京改装车展上,展出了采用板料数控渐进成形技术加工的“S800”跑车发动机罩等产品,华中科技大学利用该技术加工了汽车门及翼子板等部件。板料数控渐进成形技术在医学上可以根据患者口腔以及身体的特点、尺寸、结构,专门设计、制造医疗用品,实现个性化治疗。

## 1.2 板料数控渐进成形工艺特点

板料数控渐进成形技术是一种新型的板料加工技术,与传统的板料成形工艺相比,实现了无模成形;与其他无模成形工艺相比,是分层逐点成形,能充分发挥板料成形性能;与快速原型制造技术相比,加工的零件可直接或经少量的处理后使用。

### 1.2.1 与传统板料成形工艺比较

传统板料成形工艺是指利用模具,在压力机上对板料施加压力使其分离和变形,从而得到一定形状并且满足一定使用要求的零件的一类加工方法。在板料数控渐进成形过程中,板料在外力作用下仅仅发生塑性变形,不产生剪切分离,因而与传统板料成形工艺中的分离工序有着显著区别,与拉深、胀形等成形工序有一定的类似。

拉深是利用拉深模具将冲裁好的平板毛坯压制成各种开口的空心工件,或将已制成的开口空心件加工成其他形状空心件的一种冲压加工方法。拉深也叫拉延。以一平板圆形毛坯被拉成一圆筒形拉深件为例,拉深变形过程如图 1-3 所示。随着凸模 1 的不断下行,留在凹模 3 端面上的平板圆形毛坯 4 外径不断缩小,平板圆形毛坯 4 被逐渐拉进凸、凹模间的间隙中

形成直壁，而处于凸模 1 下面的材料则成为拉深件 5 的底，当平板圆形毛坯 4 全部进入凸、凹模间的间隙里时拉深结束，平板圆形毛坯 4 变成具有一定直径和高度的圆筒形拉深件 5。用拉深工艺可以得到筒形、阶梯形、球形、锥形、抛物线形等旋转体零件，也可以制成盒形件等非旋转体零件，如图 1-4 所示。

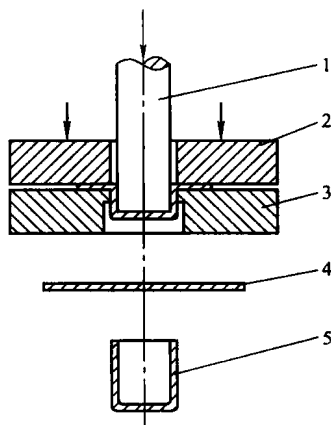


图 1-3 圆筒件拉深

1—凸模 2—压边圈 3—凹模  
4—平板圆形毛坯 5—拉深件

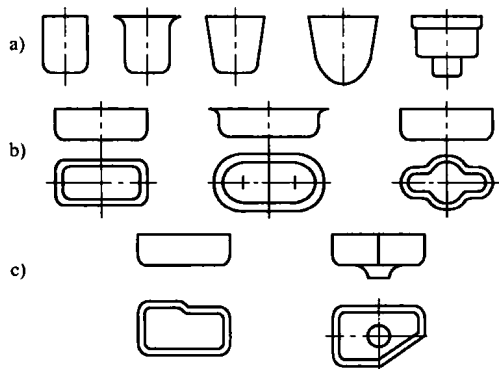


图 1-4 拉深件

a) 轴对称旋转体拉深件 b) 轴对称  
盒形拉深件 c) 不对称复杂拉深件

胀形是利用模具使板料拉深变薄，局部表面积增大以获得零件的加工方法，主要用于平板毛坯的局部胀形、圆柱形（或管形）毛坯的胀形及平板毛坯的胀拉成形等。胀形一般通过刚性分瓣式凸模或液压，将毛坯由内向外膨胀使之成为各种曲面零件，如图 1-5 所示。胀形塑性变形区局限于与凸模接触部分，在凸模力的作用下，变形区材料受双向拉应力作用，沿切向和径向产生伸长变形，材料既不从变形区流向外部，也不从外部流入变形区。成形面积的扩大主要是依靠毛坯厚度变薄而获得。

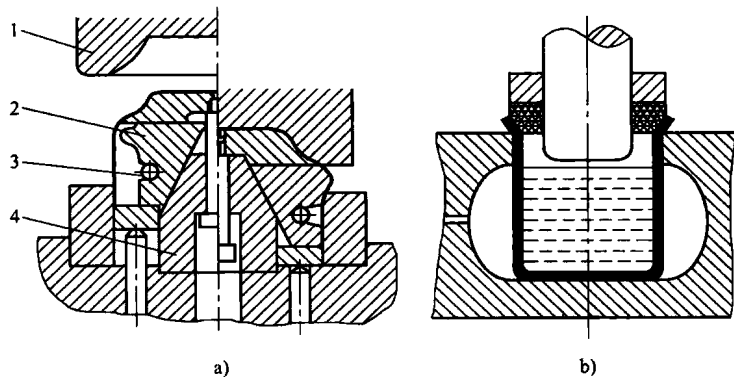


图 1-5 胀形方式

a) 刚性分瓣凸模胀形 b) 液压胀形

1—凹模 2—分瓣式凸模 3—拉簧 4—锥形芯块

板料数控渐进成形技术是通过数控程序控制成形工具进行分层逐点成形，依靠变形的累积，获得最终形状的成形方法。板料数控渐进成形工艺与传统板料成形工艺如拉深、胀形相比，其优点如下：

1) 实现了无模成形, 不需要模具或仅需要简单的模具, 节约了模具制造的费用, 降低了生产成本。

2) 省去了模具的设计制造时间, 从产品设计到制造周期变短, 缩短了产品对市场需求的反应时间, 易于快速制造。

3) 板料数控渐进成形技术采用的是逐点渐进成形, 能对板料变形进行逐点控制, 依靠变形的累积最终成形, 更能充分地利用材料的成形性能制造变形程度更大的零件。同时板料数控渐进成形技术能够在板料局部区域成形出常规成形方法无法成形的具有复杂曲面的形状。板料局部成形所需要的成形力小, 设备能耗低, 近似于静压力, 振动小、噪声低, 属于绿色加工。

4) 从成形制件的壁厚来看, 利用板料数控渐进成形技术, 在理论上来说可以控制板料每一点的成形, 因而制件壁厚均匀。传统的拉深成形变形区域主要是凸缘部分, 胀形塑性变形区局限于与凸模接触部分。利用拉深、胀形等成形制件时, 无法对板料微小局部成形进行控制, 因而成形出制件的壁厚无法达到均匀状态。以拉深为例, 在凸模圆角靠近直壁处和凹模圆角靠近直壁处存在着材料厚度变化的两个极值点, 所以拉深成形制件壁厚不均匀。

5) 利用拉深可以成形出筒形、球形、锥形等回转件及盒形件等非回转件, 板料数控渐进成形也可以成形出上述类型的零件。利用拉深成形非直壁回转件(如球面、锥面及抛物面)时, 往往需要多个步骤, 而多步骤意味着多副模具, 因而成形时间长, 成本高。以锥形件为例, 当成形高锥形件( $h/d > 0.7 \sim 0.8$ ,  $\alpha \leq 10^\circ \sim 30^\circ$ , 如图 1-6 所示)时, 由于变形程度很大, 很容易产生严重变薄而引起拉裂或起皱, 因此常采用特殊的拉深工艺, 如图 1-7 所示的阶梯拉深成形法、锥面逐步成形法和锥面一次成形法。而利用板料数控渐进成形高锥形件时, 若对目标工件壁厚要求不高, 一般通过单道次或两道次即可成形出目标制件, 提高了生产效率。

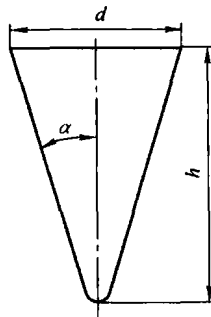


图 1-6 锥形件

6) 从产品生产自动化程度来看, 板料数控渐进成形与传统的板料成形工艺相比, 其三维造型、工艺规划、成形过程模拟、成形过程控制等全部通过计算机完成, CAD/CAM 一体化制造, 自动化程度高。

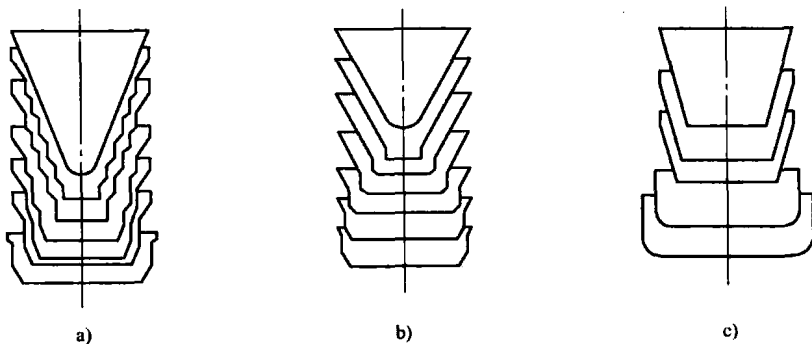


图 1-7 特殊拉深工艺

a) 阶梯拉深成形法 b) 锥面逐步成形法 c) 锥面一次成形法

板料数控渐进成形工艺与传统板料成形工艺相比, 其缺点如下:

1) 板料数控渐进成形工艺不适合大批量的生产。这主要由于成形过程中加工每一个制件都需要装夹固定板料,此外机床加工成形速度不宜过快,需要将加工成形速度限制在一定的合理范围内。上述因素导致成形制件时间较长,不适合于大批量的生产。

2) 用于板料数控渐进成形的板料规格有一定限制,由于受现阶段用于成形的机床主轴所能承受的成形力限制,板料的厚度不宜过大。

### 1.2.2 板料数控渐进成形与其他无模成形工艺比较

随着现代工业的飞速发展,金属板料成形件的需求量越来越大,特别是在航空航天、轮船舰艇、汽车等行业,板料成形件占有举足轻重的地位。在传统板料成形方法中,模具成形方法以其适应性广、生产效率高、适合大批量生产等诸多优点,多年来一直占据着主导地位。但模具成形方法,周期长、费用高、难以适应小批量、多品种和样品试制的需要,因此板料无模成形工艺应运而生,并越来越多地被采用。

金属板料的无模成形很早就有人进行了探索,近年来由于科学及经济的迅猛发展,加之机械和控制技术的发展,无模成形技术有了新的发展。板料无模成形技术是指通过非模具的成形工具使板料发生塑性变形,得到目标制件的成形方法。从成形轨迹的空间分布特点来看,板料无模成形技术可以分为离散点击成形和连续碾压成形。其中,喷丸成形、成形锤成形、多点成形、激光成形属于离散点击成形方法,而旋压成形和板料数控渐进成形属于连续碾压成形工艺。

#### 1. 喷丸成形

喷丸成形技术是20世纪50年代初伴随着飞机整体壁板的应用,在喷丸强化工艺的基础上发展起来的一种很有发展前景的新工艺方法,它是飞机制造中成形整体壁板和整体厚蒙皮零件的主要方法之一。喷丸成形是利用高速金属弹丸流冲击金属板料表面,使受撞击表面及其下层金属产生塑性变形而延伸(图1-8a),从而使板料产生向受喷面突起的弯曲变形而达到所需外形的一种成形方法。喷丸成形的方法有:预应力喷丸成形技术、数字化喷丸成形技术、新型喷丸成形技术(双面喷丸成形技术、激光喷丸成形技术、超声喷丸成形技术、高压水喷丸成形技术)。

喷丸成形技术目前主要应用于航空航天领域,其主要特点是:①工艺装备简单,不需要成形模具,因此零件制造成本低,对零件尺寸大小的适应性强;②由于喷丸成形后,沿零件厚度方向在上、下两个表面均形成残余应力(图1-8b),因此在零件成形的同时,还可以改善零件的抗疲劳性能;③既可以成形单曲率零件,也可以成形复杂双曲率零件。但该方法成形机理十分复杂,影响成形过程的因素较多,使得喷丸成形工艺参数的选择仍要依靠庞大的实验数据库和操作经验,耗时耗资。

喷丸成形与板料数控渐进成形最大的区别在于,喷丸成形是利用高速金属弹丸流冲击金属板料表面,使受撞击表面及其下层金属产生塑性变形,而板料数控渐进成形是利用成形工具在板料上进行逐点分层加工,是一个变形累积的过程。对于板料数控渐进成形的操作无需太多经验,工艺参数的选择也无需庞大的实验数据。此外在成形过程的模拟方面,目前针对喷丸成形过程模拟方面的研究方法主要有弹丸撞击法和等效载荷法。虽然弹丸撞击法与喷丸的物理过程非常接近,但是对于实际零件成形过程的模拟,由于弹丸尺寸与零件尺寸之间的差异,仍然无法完全实现喷丸成形全过程的数值模拟,从一定程度上限制了对该工艺的研

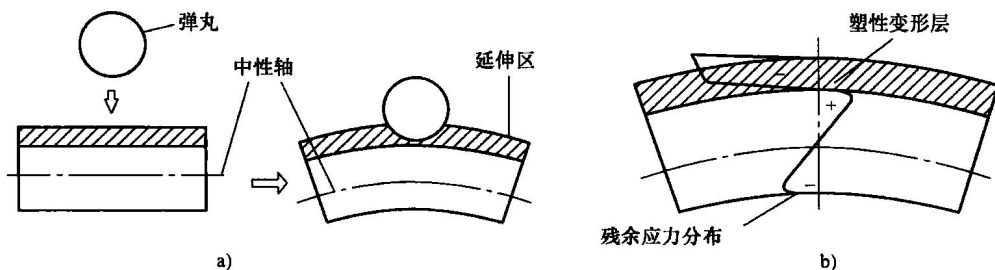


图 1-8 喷丸成形基本原理

a) 喷丸成形变形过程 b) 残余应力情况

究。虽然对于板料数控渐进成形过程的模拟还不完善，但有限元数值模拟方法已经成为研究该工艺的强有力工具。

## 2. 成形锤成形

成形锤成形是将金属板料放置于刚性冲头和弹性橡皮模之间，通过不断地锤击板料各区域进行局部成形，逐步成形为所需形状，制件加工过程如图 1-9 所示。20 世纪 90 年代，日本进行了 CNC 成形锤成形法的研究，该成形技术方法简单，成形速度较快，但是只能成形形状比较简单的制件，而且成形后留下大量锤击压痕，影响制件的表面质量，因而必须进行后续处理。

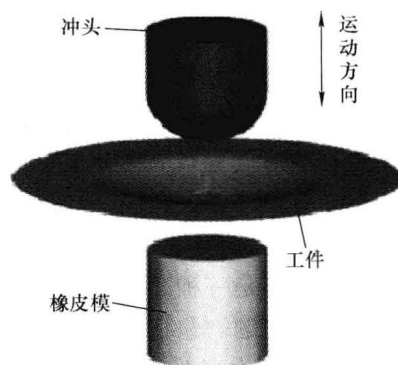


图 1-9 成形锤成形

成形锤成形是利用锤击对板料各区域分别进行局部成形，一次变形量较大，成形后制件表面需要进行后续处理才能使用。板料数控渐进成形虽然也是用成形工具对板料进行局部成形，但该工艺引入分层制造的思想，把三维的目标工件离散成一系列二维切片分层加工，每层变形量较小，制件最终的成形是通过变形的累积，因此较高发挥了板料的成形性能，也提高了材料的利用率。

## 3. 多点成形

多点成形是由一系列规则排列、高度可调的基本体（或称冲头）组成的阵列形成离散曲面来代替传统的模具进行板料三维曲面成形的柔性加工技术，如图 1-10 所示。多点成形可分为多点模具、多点压力机、半多点模具及半多点压力机等四种有代表性的成形方式，其中多点模具与多点压力机成形是最基本的成形方式。

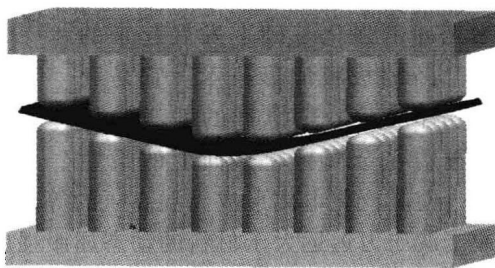


图 1-10 多点成形

多点成形作为一种新型的冲压成形技术已经开始在一些领域得到应用。在国外较好的实际应用是航空制造领域：美国已经将多点成形用于飞机蒙皮的成形；在国内，很多领域也都应用了多点成形技术，主要有建筑结构件与装饰件、高速列车流线型车头覆盖件、船体外板等产品的成形。

多点模具成形时首先按所要成形零件的几何形状，调整各基本体的坐标位置，构造出多点成形面，然后按这一固定的多点模具形状成形板料。成形面在板料成形过程中始终保持不

变,各基本体之间无相对运动。多点压力机成形是通过实时控制各基本体的运动,形成随时变化的瞬时成形面。在成形过程中,由于其成形面不断变化,各基本体之间存在相对运动。在这种成形方式中,从成形开始到成形结束,上、下面所有基本体始终与板料接触,从而夹持板料进行成形。这种成形方式能实现板料的最优变形路径成形,消除成形缺陷,提高板料的成形能力。这是一种理想的板料成形方法,极大地提高了加工柔性,但要实现这种成形方式,压力机必须具有实时精确控制各基本体运动的能力。

多点成形虽然初步实现了无模成形,但仍存在以下缺点:①该技术是将基本体离散成具有柔性模具作用的曲面,但是由于基本体不可以制作得很小,所以不能加工形状复杂的零件;②多点成形法加工零件,容易产生表面压痕、起皱等缺陷,精度不容易控制;③只适用于加工厚板,不适用于薄板成形。

多点成形的核心原理是将传统的整体模具离散成一系列规则排列、高度可调的基本体,也就是由基本体的包络面来成形板料。而板料数控渐进成形则由成形工具的运动轨迹所形成的包络面来代替模具的型面,对板料进行逐层加工,最终将板料成形为目标制件。板料数控渐进成形由成形工具运动轨迹形成的包络面与多点成形中基本体组成的包络面相比,成形更为灵活。能形成复杂的曲面即可成形出具有复杂曲面形状的制件,目前多点成形还无法实现这一点。

#### 4. 激光成形

激光成形是一种非接触式塑性加工方法,不需要考虑模具的制作费用、制作周期、磨损、润滑等问题。包括激光热应力成形和激光冲击波成形两种成形形式。

激光热应力成形是利用激光束扫描金属薄板表面,在热作用区域产生明显的温度梯度,导致非均匀分布的热应力,使板料产生塑性变形的一种工艺方法。图 1-11 所示为板料激光成形。激光冲击波成形是在激光冲击强化基础上发展起来的一种全新的板料成形技术。它是利用高功率密度、短脉冲的强激光作用于覆盖在金属板料表面上的柔性

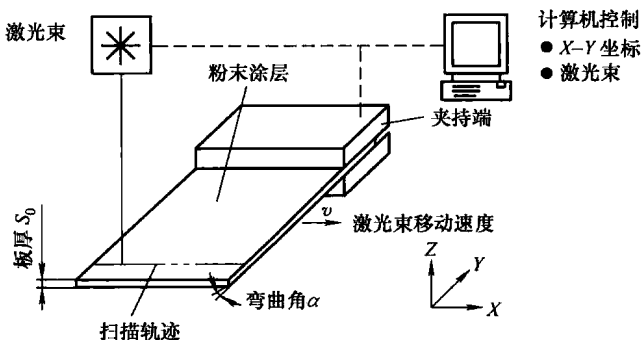


图 1-11 板料激光成形

贴膜,使其汽化电离形成高温高压的等离子体而爆炸,产生向金属内部传播的强冲击波,由于冲击波压力远远大于材料的动态屈服强度,从而使材料产生塑性变形。由于激光成形仅靠热应力使板料成形,所以其不存在模具制作的问题,使生产周期短、柔性大;同时,激光成形作为一种热态累积成形,能够成形常温下的难变形材料和高硬化指数金属。激光成形工艺具有高精密、高质量、非接触性、洁净无污染、无噪声、材料消耗少、参数精密控制和高度自动化等特性。

板料数控渐进成形时成形工具须与板料表面接触,而激光成形是一种非接触的成形工艺,通过远程作用在有限的空间或不可接触的位置上进行精确成形。激光成形的材料非常广泛,包括各种碳钢、不锈钢、合金、有色金属以及金属基复合材料等利用常规工艺不能加工或难以加工的材料。目前板料数控渐进成形技术受制于成形设备的成形能力,所能成形的材

料种类及板料厚度的范围有限。板料数控渐进成形时对板料实行逐点分层加工,能够充分发挥板料的成形性能,有效控制成形制件壁厚,同时可以成形出具有复杂曲面的制件,这些是目前激光成形所不具备的。鉴于两者的优点,目前已经出现一种作为热渐进成形的激光辅助渐进成形工艺,该工艺成形规律有待进一步地研究。

### 5. 旋压成形

金属旋压成形工艺是将板料或毛坯重心夹紧在芯模上,由旋压机带动芯模和毛坯一起高速旋转,同时用赶棒加压于毛坯,使毛坯产生局部塑性变形并使变形逐步扩展,最后获得所需形状和尺寸的制件,如图 1-12 所示。旋压是一种无切削的先进加工工艺,采用这种工艺,可以节约原材料,提高材料的利用率。

旋压成形工艺针对不同毛坯的变形特点,一般可以分为普通旋压和强力旋压两种。在旋压过程中,改变毛坯的形状而基本不改变壁厚的称为普通旋压;既改变毛坯的形状又改变壁厚的称为强力旋压(又称变薄旋压)。根据旋压件的类型和金属变形机理的差异,强力旋压可分为锥形件强力旋压(或称为剪切旋压)和筒形件强力旋压(或称为流动旋压)。

在旋压过程中,由于赶棒与毛坯的接触面积小,所以毛坯瞬间的变形区小,总的成形力和机床吨位相对于其他压力加工方式来说较低。旋压工艺只适用于加工空心回转体零件,且板料的厚度不能太大,生产效率和精度低,影响产品质量的工艺因素复杂,对旋压设备和技术的要求较高。因此,旋压成形工艺仅适用于简单薄壁回转体零件成形,难以成形非回转形状零件。

从成形零件的形状来看,旋压成形工艺除了成形筒形、锥形、椭圆形等薄壁回转体零件外,其他复杂形状的零件用旋压成形往往是不经济或难以实现的;板料数控渐进成形工艺既可用于成形回转体零件,也适用于成形非回转形状零件,同时还可以成形出传统成形工艺难以成形的具有复杂曲面形状的零件。从批量生产的适用程度来看,旋压成形工艺的批量化有一定限制,过大过小都不经济,以中小批量较为有利;而板料数控渐进成形工艺既适用于单件或很小批量的生产,也适用于中批量的生产,灵活性较大适用范围较广。从产品生产自动化程度来看,板料数控渐进成形工艺与旋压成形工艺相比,其三维造型、工艺规划、成形过程模拟、成形过程控制等全部通过计算机完成,CAD/CAM 一体化制造,自动化程度高。

强力旋压与有支撑数控渐进成形具有一定的相似性:毛坯有芯模支撑,在压力作用下利用金属的塑性,逐点将毛坯加工成所需要的形状。然而两者也有显著的区别:在有支撑数控渐进成形过程中,毛坯与支撑芯模一般是固定不动的,这与强力旋压过程恰恰相反;有支撑数控渐进成形过程中成形工具在数控程序驱动下的运动相比于强力旋压过程中存在的手工操作,对制件壁厚的控制更有利,成形后制件的壁厚分布也较理想。在有支撑数控渐进成形中,制件壁厚的变形规律类似于锥形件强力旋压成形中制件壁厚遵循的正弦定律,虽然不完全吻合,但对制件壁厚的预测及路径的设计具有一定的指导意义。

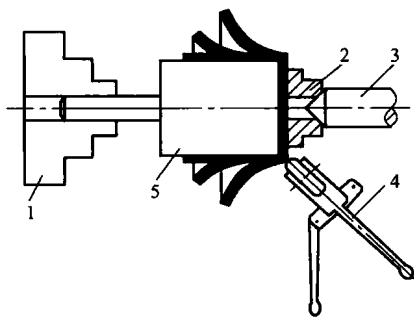


图 1-12 旋压成形

1—卡盘 2—顶块 3—顶针  
4—赶棒 5—芯模



### 1.2.3 板料数控渐进成形技术与快速原型制造技术比较

快速原型制造（Rapid Prototyping Manufacturing, RPM）技术以离散堆积原理为基础和特征，即把零件的数字模型（三维模型）按一定方式离散化，使之形成可加工的离散面、离散线和离散点，然后采用多种手段将离散面、线和点，再堆积成零件形状。由于工艺过程中不需要专用工具，工艺步骤简单，所以制造速度比传统工艺制造速度快很多，也称为自由成形制造。由于这种技术制造速度非常快，是传统工艺技术的几倍、十几倍乃至几十倍，所以被人们称为快速原型制造技术。快速原型制造技术的出现，打破了传统的实体模型制造模式，使产品的创新、升级换代速度大大加快。

快速原型制造技术利用离散堆积的原理来制作产品原型，如图 1-13 所示，其基本原理是在计算机上构建产品的三维设计模型，对其进行分层切片并得到各层的截面轮廓数据，计算机依据此数据信息控制快速原型制造系统的激光器有选择性地通过激光进行树脂固化（切割箔材、烧结粉末或通过喷嘴喷射粘结剂、热熔材料等），形成一系列具有微小厚度的薄层，并逐步叠加成三维实体，从而制造出所设计的新产品样件、模型或模具。快速原型制造技术主要的方法有：选择性液体固化法、层片添加法、选择性粉末烧结/粘结法、熔融挤压成形法和喷墨印刷法。

虽然板料数控渐进成形技术引入了快速原型制造技术分层制造的思想，但两者有着很大的区别。

1) 在快速原型制造技术中是将一系列具有微小厚度的薄层逐步叠加成三维实体。板料数控渐进成形技术利用成形工具对板料进行分层逐点加工，虽然也有叠加的思想，但该技术是依靠每一层上逐点变形的累积而成形出目标制件。

2) 从制件品质性能来看，在快速原型制造技术中，由于受材料性能的限制，制作的原型在大多数情况下不能作为实际的零件使用，因此还必须用快速原型技术制造模具，再用模具生产零件。而利用板料数控渐进成形的零件可直接或经过少量处理后使用。

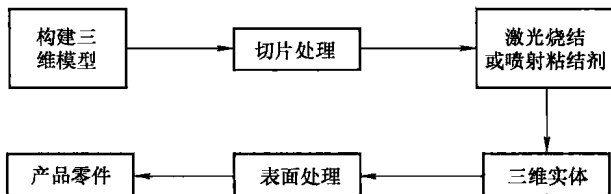


图 1-13 快速原型制造技术原理框架

## 1.3 板料数控渐进成形技术的应用

板料数控渐进成形技术是针对现代社会产品要求日益多样化、个性化，产品设计不断创新，更新换代速度不断加快等特点而发展起来的塑性加工技术，它适应了产品的创新设计，适应了多品种、少批量生产，适应了交货时间短、快速响应用户需要等要求。该技术可以直接应用于汽车工业、航空航天、医疗器械、家居装饰、厨房用具、洁具、工艺美术品等产品的设计制造，对提高我国相关企业的市场竞争力具有重要的意义。

### 1. 车辆制造业

目前，在国际汽车市场每年都有大批新车型上市，如何快速、低成本和高质量地开发出新车型是汽车制造业面临的一大难题。传统成形工艺需要采用模具加工，而传统模具的设计和试制过程周期长、费用高，在很大程度上影响了新车型的开发周期和成本。将板料数控渐