

在这四种物体中,板料为弹塑性变形体,其余三种均可作为刚体看待,但三种刚体的运动特性各不相同。上模作为对板料加载的主动体其运动状态主要由压力机控制,按一定的频率作上下往复冲压运动。压板在压边力作用下基本固定不动,但当压边力不够时工件可能在压边处产生起皱,从而使压板作小幅度的上升运动和轻微的转动,同样当压板处板料厚度减小时,压板可能作轻微的下降运动。由此可见,压板的运动严格说来与板料的变形状态有关。下模通常是固定不动的。基于上面的分析可假设上模和下模的运动是给定的,压板上的压板力也看作是给定的,并且压板只作刚体运动。这样一来薄板冲压成型的计算问题就可粗略地表达为如下力学问题:

给定:①上模、下模和板料的几何特性;②上模的运动特性;③压板的质量分布;④板料的初始几何特性;⑤板料的弹塑性变形特性;⑥板料与上模、下模及压板间的摩擦特性,求出板料的弹塑性变形过程。

### 1.3 板料展开的研究概况

板料形状和尺寸的求解是薄板冲压成形中的一个难题,板料形状的确定是设计和制定工艺流程的前提之一。板料形状设计得合理,冲压过程中材料的流动将更合理,从而明显地减少起皱、拉裂的发生,提高材料的可成形性。对于复杂的冲压件,采用经验和解析方法至今未能获得满意的结果。

获取冲压件的初始板料形状是分析冲压件变形程度、设计工艺及拟订工艺规程的前提。如果板料形状合理,变形沿板料分布不均匀的现象就能够得到明显改善,成形极限也可有所提高,并尽可能减少切边余量,节约板料。此外,采用合理的板料形状,往往能够使某些需要二次拉深才能成型的冲压件,采用一次拉深便可达到制件的要求。对于不规则冲压件,由于其形状的复杂性,不可能用解析方法来求得它的板料外形,至今未能得到满意的结果。因此求解板料展开形状成为冲压工艺设计中一个重要而亟待解决的问题。

在金属加工成形的早期,人们对锤击金属中经验的积累即形成了经验法,后来,随着被加工件的逐步复杂,对规律的认识逐步增多及相关技术的逐步成熟,其他技术方法相继提出。70年代K.Lange等人利用滑移线法对初始板料的外形进行了研究,80年代中期,势场模拟法也相继提出。80年代末期,J.C.Gerdeen和P.Chen提出几何映射法,并开发了针对特定问题的求解程序。90年代初期,常志华等用滑移线法研究了盒形件拉深板料展开尺寸的确定方法,并给出了相关的计算公式及简化作图法。自Marcal和King及Yamada等开创弹塑性有限元法,并由Hibbit等采用Lagrange描述和Osias. McMeeking等采用Euler描述基于有限变形理论分别建立了大变形弹塑性有限元列式,有限变形弹塑性有限元法随即就被应用于板料成形分析。弹塑性有限元法分析板料成形问题,不仅能计算工件的变形和应力,应变

分布, 而且还能计算工件的回弹残余应力、应变及处理卸载问题。增量弹塑性本构关系不允许使用大的变形增量, 因而计算的时间较长。实践证明, 弹塑性有限元法能够有效模拟板料成形, 是板料成形模拟的主要方法。随着计算机软硬件技术的发展以及工程数学、有限元方法、模具制造的交叉和结合, 新近发展起来的基于数值模拟的计算机辅助工程技术在冲压件板料的确定领域得到了逐步的应用。

人们对确定冲压成形件的板料外形在某些方面(如平底压延件的展开)已取得了良好的进展。但由于板料外形的确定涉及到材料的流动规律等复杂因素, 特别是几何形状复杂的(非轴对称旋转体或非平底压延等)冲压成形件, 要完全精确地测算其板料外形是极其困难的。长期以来, 有关这方面的研究一直在继续, 人们进行了大量的探索工作, 提出了许多预测和估算方法, 如: 经验法、滑移线法、势场模拟法、几何映射法、理想变形路径法、有限元增量法、有限元逆算法(一步算法)等, 但这些方法都由于计算复杂和结果的不准确, 实际使用有较大的限制。直到近年来, 基于数值模拟的计算机辅助工程(CAE: Computer Aided Engineering)技术在冲压件板料的确定这一研究领域得到了越来越多的应用。

随着计算机应用和计算机辅助技术的迅速发展, 板金零件展开板料计算方法在计算速度、计算的准确性等方面有了很大的提高, 但是上述计算方法或多或少的存在下列问题:

(1) 对零件的板料展开具有一定的局限性, 只能对某种零件适用: 例如滑移线法只适用于平底零件和弯曲或拉深高度相等的情况; 物理模拟法只适用于各向同性板料的平底零件坯料确定, 对其它类型的板料零件无法展开。

(2) 假设的条件不成立或难以满足, 例如拼合法对压延过程中凸缘材料流动的非连续性组合假设和整体转移假设, 使得此方法要得到较高的准确度, 就必须假设对应的零件尺寸尽可能地缩小, 而这种假设与实际是不相符的。

(3) 计算复杂, 消耗的时间长, 例如增量有限元法。

(4) 上述方法除反向法外均用于拉深件板料展开, 而反向法虽可用于弯曲件展开, 但对于多道工序成形的弯曲件目前还不能进行展开, 同时需要应用三维软件进行构型。

由于还没有一个比较通用的方法能计算不同板金零件的毛坯, 已有的方法由于对材料的性能和边界条件考虑较少, 所以得到的毛坯也是比较近似的。一个完善的毛坯设计方法应具有以下的特征:

(1) 通用性, 应该不受制件形状的影响, 能处理任何复杂的零件并考虑不同的生产工艺情况。

(2) 准确性, 设计出的毛坯应该在相应的工艺条件下能加工出满足质量要求的制件。

(3) 实用性, 应该能将方法包含在一套软件系统中, 一般工程师就能很好的运用它去解决实际生产中的具体问题。

因此, 毛坯设计要和其它工艺和材料性能相结合。

## 1.4 课题的研究意义及目的

随着工业化的日益发展, 产品的更新换代周期越来越短, 新材料越来越多地被采用, 市场竞争的激烈, 导致了现有的冲压件形状越来越复杂, 要求的精度越来越高。由于这类冲压件的流动规律和变形特点都非常复杂, 这就给工艺编制、模具设计和模具调试带来很大的难度。此时仅靠经验的设计方法与分析以及工艺试验式的生产方法已很难满足要求。实际上, 板料成形工艺设计涉及到很多因素, 如: 模具尺寸、毛坯形状尺寸、板料厚度、压边力、拉延筋抗力、摩擦和润滑等。毛坯形状尺寸的确定是板料成形工艺设计中的一个重要问题, 合理的毛坯形状尺寸不仅节省原材料, 减少后续工作量, 降低了生产成本, 而且可以明显改善成形性能, 减少缺陷的产生, 提高产品的质量。然而, 确定合理的毛坯形状尺寸并不容易, 人们已经提出了很多种确定合理毛坯的方法, 但是, 传统或经验的计算由于其计算的繁杂与不精确性, 在生产中的应用一直有限。直到现代应用数学力学、非线性有限元方法、计算机科学与技术以及通信技术的发展, 板料毛坯计算的问题才得以用科学的方法与技术解决。当前, 可以利用计算机反复模拟成形过程, 能较准确地掌握材料流动的情况而计算出零件毛坯的外形边界线, 把边界线以外的单元去掉, 就可以得出毛坯外形, 经多次反复模拟和优化计算就能得出较为合理的毛坯外形, 以保证拉深顺利进行。

冲压成形的过程包括成形材料选择、成形件坯料制备、成形工序制定、模具设计、模具制造、成形操作、后续处理等部分。而成形工序的制定是关键。冲压成形的基本工序包括弯曲、胀形、拉深和翻边, 其中, 拉深成形所占的比例最大, 由拉深引起的工艺缺陷也最多。而成形件坯料制备是拉深成形工艺得以实施的首要考虑因素之一, 因此拉深件板料计算正确与否, 不仅直接影响生产过程, 而且对整个冲压件生产有重大的经济意义, 因为在冲压零件的总成本中, 材料费用占到 60-80%<sup>[6]</sup>。

求出冲压件的展开板料, 是分析冲压件变形程度, 设计工艺及拟订工艺规程的前提。如果板料形状合适, 变形沿板料分布不均匀的现象能够得到明显改善, 成形极限也可有所提高, 并能降低突耳高度, 减少切边余量。此外, 采用合理的板料形状, 往往能够使某些需要二次拉深才能成形的制件, 用一次拉深就可达到制件要求的高度。对于不规则冲压件, 由于其形状的复杂性, 不可能用解析方法来求得它的板料外形, 至今未能得到满意的结果。因此求解板料展开形状成为冲压工艺设计中的一个重要而亟待解决的问题。

## 1.5 本文的主要研究内容

影响板料成形工艺性能的因素有模具形状、板料尺寸、压边力、材料参数、摩擦及润滑等。随着板料成形模拟技术的发展，在生产加工之前对成形过程进行数值模拟已日趋普及。基于流动理论的增量有限元方法可以全面考虑各种影响因素，是目前较精确的方法。但在产品及工艺设计的早期阶段，设计人员最重要的是如何根据产品模型迅速得到毛坯展开形状及工件的厚向应力应变分布等信息；而采用增量法较为耗时。作者在有限元仿真的基础上提出了一种新的板料优化的方法——比例因子法，该方法不仅思路清晰且精度高。

本文主要做了以下几点工作：

(1)简述了国内外冲压成形及板料展开的现状与发展趋势。

(2)介绍了几种典型的板料展开方法的理论依据，详细地给出了，在假定成形过程是比例加载的，仅仅考虑初始的板料和变形终了的状态，不考虑变形的中间状态的前提条件下建立起来的一步逆成形有限元分析方法的计算公式及其求解过程。

(3)本文在有限元仿真的基础上，提出了一种新的板料优化方法——比例因子法。作者提出的比例因子法，在调整初始板料线时，不是给各个节点一个相同的调整量，而是依各个节点的比例因子  $\omega$  及形状误差值计算出相应的调整量，这样调整的针对性强，计算结果更精确，需要迭代的时间也更少。

(4)结合一步算法，从最终零件形状直接反求初始展开板料，再经比例因子优化法对该初始展开板料进行优化，使板料在冲压后达到形状及成形要求后，迭代停止。通过现场实例验证，对于确定直接成形件及二次拉延件的初始板料的形状及尺寸，该方法都得到验证，并取得很好的效果。

(5)该比例因子优化方法，不仅可以用于冲压件的初始板料形状及尺寸的优化计算，还可以推广到具有翻边结构的冲压件的修边线的优化计算中。文中最后一章的第三节就以某轿车翼子板零件为例验证了该方法在修边线优化计算中的精确性及合理性。

## 第 2 章 常见的板料展开方法

影响金属板料成形的因素很多，如：模具的形状、材料性能、板料形状和尺寸、边界条件、模具和板料之间的摩擦和润滑等。因此，在金属板料成形工艺设计时就要综合考虑上述各个因素的影响。其中板料形状和尺寸设计占据重要地位，因为它直接关系到材料的利用率和成本。不仅如此，合理的板料设计，还有助于改善工件的应力、应变状态，提高极限拉深比、获得厚度变化均匀和凸缘规整平齐的高质量成形件。然而，确定合理的板料并不容易，长期以来，人们经过大量的探索工作，提出了许多预测和估算方法，其中：经验法、滑移线场法、势场模拟法、几何映射法及有限元法、结构进化法、流线法及反馈补偿算法是几种比较典型的方法。

### 2.1 经验法

经验法即根据面积不变原则进行板料展开计算，是目前在实际生产中广泛应用的计算方法。原则上，冲压件的板料尺寸应按照塑性变形体积不变原则确定，然而为了简化计算，通常忽略成形过程中板料的厚度变化，即取板料的表面积等于零件的表面积。该方法依据已往零件的图例进行经验估算，利用手工试凑法估算出一个初始参考形状，在试模阶段根据实际情况不断修正而确定最终的板料形状。由于冲压成形过程的力学分析相当复杂，涉及到材料的流动规律、润滑情况、压边力等因素，要解决实际生产的需要，人们只能采用近似的几何估算方法，再通过试模进行修正。

现在工厂中最常用的方法是分别计算矩形直边部分的展开长度和圆角部分的展开半径，然后在过渡区域以圆弧和直线相连接。依据此方法确定的毛坯在实践中是可行的，对于形状规则的零件展开较为准确，但不适用于形状复杂的零件。罗曼诺夫斯基提出了一种分区域计算的方法，在原来的基础上有较大的改进，但准确度有待进一步提高。所有这些求矩形毛坯的方法，都是凑合性质的经验方法。

### 2.2 滑移线场法

滑移线法（Slip Line Field Method）是 50 年代前苏联的楚达列夫提出来的，它的提出第一次给板料的求解找到了理论依据。滑移线法的基本假设<sup>[7-10]</sup>：板料法兰厚度不变，且处于平面应变状态，材料各向同性，无硬化，不考虑摩擦力对塑