似，表现为径向受拉、切向受压的应力状态；而直边处的材料仅受单向拉应力(假设直边长度足够长)，变形行为与拉弯类似。所以在盒形件的拉深过程中，圆角与直边交接区域的材料的变形较为复杂，会出现圆角部分材料向直边部分转移的情况。因而，盒形件的理想毛坯形状不能采用圆筒形拉深件的毛坯外形确定方法。

对于盒形件毛坯的确定，以前工厂用的较多的方法是经验作图法。经验作图法是人们在长期实践中总结出来的一种简单的毛坯确定方法，先根据已有相近零件的毛坯做参考把工件毛坯的大致形状确定下来，然后再反复试验修改，直到达到要求为止。虽然目前工厂中也总结了一些经验方法，如杜忠友[107]通过理论计算公式求得理论毛坯尺寸，进行拉深，再加上画辐射线和测量的方法得出某种特定的盒形件的毛坯外形。但是这种方法只是形状上接近合理毛坯，尺寸精度较低，毛坯的整个确定过程也较繁琐，只适用于形状简单的零件。

目前随着计算机软硬件的发展，人们对盒形件拉深过程也进行了更加深入的理论研究，并且借用各种现有的软件完成了对于盒形件的毛坯外形及尺寸的预测。目前国内外提出的毛坯形状的理论方法主要有：滑移线法、模拟法、有限元法(FEM)、边界元法(BEM) [108]、BP 神经元方法、敏感度方法等。

2.3.1 滑移线法

用滑移线场（SLF）理论来确定合理毛坯外形的技术已经较成熟[108]。目前人们针对此方法已经进行了大量的研究[108][109][110][111]。滑移线场法已经被用于求等截面杯体、各类盒形件及某些不规则形状筒形件。

滑移线场理论的基本原理是：假定在拉深过程中板料法兰厚度没有变化，而处于平面应变状态，材料各向同性，无硬化，不考虑摩擦力分布对塑性流动的影响。滑移线法根据毛坯的轮廓线与变形区内的滑移线夹角成±45°，然后根据递推公式求出毛坯轮廓线与滑移线的交点，最后把这些交点连接起来就构成毛坯的轮廓线。当然该方法使用的前提要已知变形区的滑移线场，滑移线场的精确与否对轮廓线的精度有很大的影响。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

用滑移线方法确定盒形件毛坯的轮廓线提出已经很久了，但一直未被推广使用，主要是因为采用高级语言所编的程序，所绘出的图形失真比较严重，在精度上很难达到要求，所以一直未被使用。而现在随着计算机技术和各种 CAD 软件的发展，这一问题得到了解决。日本的 Toshihiko KUWABARA[111]提出了一种基于滑移线场理论的，适用于任意形状法兰和阶梯状圆筒的优化板材形状确定方法。并将这种方法融合入 CAD 系统中。他还通过实验证实了此系统的可用性。国内的肖作义结合 AutoCAD 给出了毛坯轮廓线的方法[112]。他在 AutoCAD 的基础上采用 AutoLISP 语言，依据滑移线场理论编写了六边形盒形件的毛坯轮廓线的绘制程序；并指出此方法的可用性。岳陆游[113]等则通过茹科夫斯基保角变换法推导滑移线方程和数值积分法建立滑移线场，并由此滑移线场来绘制椭圆形毛坯的外形。

2.3.2 模拟法

模拟法[108]是在一定的假设条件下，根据许多物理问题数学描述的相似性，通过数学相似理论，采用其它物理介质构成的模型来模拟板料法兰的金属流动。Laplace's 和 poisson's 方程广泛用于应用物理和工程等领域中，同样也被应用于板料成形中。一些研究人员正努力来寻找其解决方法[108]。

模拟法有电模拟法、流体模拟法、热传导模拟法等。电模拟法用平面电流场的电压分布来模拟金属流动，并根据电的映象原理、Laplace's 方程 Dirichlet 问题的唯一性及 Laplace's 方程解的迭加性，利用双层电解液槽装置，测量等势线，可得到一定浓度的拉深件展开毛坯外形。此外，还有使用导电板料进行模拟的，这种方法中则假定拉深件法兰处的流动可与无粘性流体的无旋涡流动相似。梁炳文等使用了液体模拟法来得出毛坯外形。他们对拉深变形作了基本假设，推导出了流动描述方程：

$$\begin{cases} \nabla^2 \Phi = 0 \\ \dfrac{\partial \Phi}{\partial n}\Big|_{(x,y)\in Li} = -V_P \\ \Phi\big|_{(x,y)\in L_0} = C \end{cases}$$

由平衡方程、Levy-Mises 关系式，应变率定义及体积不变假定推出：

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$-p_i + (\frac{1}{2\lambda} u_{i,j})_j = 0$$

其中 P 为静水压力，λ 为 Von Mises 比例常数，u 为速度。他们提出了牛顿液、Bingham 体及拟塑性流体可分别来模拟常数 λ 值、线性硬化刚性模型材料及服从幂指数应力应变关系的固体材料的塑性流体。并依据上述关系研制了毛坯模拟装置。热传导模拟法用二维无内热源稳态热传导来进行模拟。

2.3.3 边界元法

这种方法从凸模轮廓（内边界）开始，内边界每个节点上的速度 q 假设一定，通过选择时间间隔，每个节点能反向移动，从而建立初始外边界。节点以法向逆向移动，根据各相邻元素的法向方向，使用平均技术。对于适当位置的边界，矩阵元素可通过外边界求出未知的 q。一旦解出 q 值，在某时间间隔内能重复使用内外边界节点速度的平均值。知道了外边界 q 值，一个新的外边界就形成了。因假定钣金是不可压缩的平面应变状态，故满足$\oint_{\Gamma_1} q d\Gamma = \oint_{\Gamma_2} d\Gamma =$常数。在这个过程中得出的每个相继边界与一个合理毛坯轮廓相对应。这种方法不太精确，但能通过少量的计算来获得节省板料的目的[108]。

2.3.4 理想成形方法（Ideal Forming）

普通的金属成形过程优化都是建立在反复试验的基础上的，同时各种工艺参数通过实验和分析来评价。然而由于这些方法非直接的本性使得经常需要大量的反复以获得最佳的工艺。为了减少反复的次数，人们提出了一种称为理想成形的直接方法。这个理论在成形工艺的初始设计阶段提供考虑最优过程参数信息。和分析理论相比，理想成形设计理论需要材料沿着最小塑性功路径变形，假定这些路径提供了最佳可成形性。除了最佳应力分布，这个设计提供了一个理想的初始毛坯形状和产品的中间形状和边

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

界牵引历史，这些都是理想成形工艺的参数。

在理想成形理论中，一个理想的毛坯形状通过优化全局的塑性功来计算，假定所有的材料元素在最小塑性功路径下变形（或者是比例对数应变路径）。在这个计算中，预先描述了一个最终的产品外形和最终产品材料元素的位置。通过计算可获得最初的材料元素位置，并由此得出最初毛坯外形。当材料元素沿着最小塑性功路径变形的时候，通过沿着描述的变形路径组合塑性流体理论可以获得一个塑性变形理论。计算理想成形中的优化总塑性功，使用塑性变形理论是特别方便的[114]。K.Chuang[114]等应用理想成形设计理论，有限元分析方法和实验开发了一种优化板材成形过程的顺序设计过程。这种顺序方法比其它基于有限元和实验组合的方法或者是单独采用实验的方法更有效率。S.H. Park，J.W. Yoon[115]等指出用于优化板材毛坯的直接的反向设计方法(如理想成形)可以在模具设计初始阶段给设计者一个基本的思想。然而，由于没有足够的精度，所以很难只用设计代码就精确地预测一个没有断裂和起皱的优化毛坯。将设计代码和分析代码结合起来则可以进行精确的毛坯设计。他们结合毛坯的理想成形理论和基于路径反复方法的有限元分析来进行精确的毛坯外形设计。他们有效地将理想成形理论和基于有限元分析的变形路径迭代结合起来了。这个方法包括两个阶段：初始的板材设计阶段和毛坯的设计阶段。初始阶段利用理想成形方法生成了一个试验毛坯；接下来，使用变形路径迭代思想可以获得目标形状的优化毛坯。变形路径迭代方法是一个新提出的方法，可以用来减少优化阶段的形状错误。

2.3.5 有限元法

随着计算机技术的迅速发展和有限元理论的日趋成熟，有限元方法在板料成形毛料计算中得到了越来越广泛的应用。这种方法的优点是利用其强大的计算优势，可以考虑成形的一切几何、物理和力学的因素，可以较精确地建模。国内外学者把有限元技术用于板料冲压成形毛料计算，提出了许多种方法，如平面应力法(如滑移线场)、刚塑性有限元法、敏感度分析法、反向法等。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

朱谨等[116]用大变形刚塑性有限元模拟正方形板料在方冲头拉延下的凸缘变形过程，并以所获得的工件形状与金属流动方向为依据，对初始板料形状进行修正。对修正后的坯料形状进行二次模拟，获得了与给定凸缘形状基本吻合的拉延件形状。他们还对不同凸缘圆角对板料优化形状的影响作了计算，讨论了保证边界轮廓位置不变的条件下网格划分的方法。

Hyunbo Shim[117]提出了敏感度方法。他通过著名动态显式分析程序 Pam-Stamp 的帮助，获得了形状的敏感度。为了从数值上获得形状的敏感度，在每个设计阶段都必须分析几个变形过程。在他的研究中选用了梯形杯，油盘和奥迪前门面板的拉延和 Numisheet'99 的测试基准问题等作为例子。在每个实例中，都通过几步更改，而没有任何假定的变形路径获得了优化的毛坯外形。在预测优化的毛坯外形的时候，同时使用了计算机模拟和实验的方法。在每个例子中通过模拟和实验的方法得到的结果都是特别吻合。他还指出敏感度方法能对三维 CAD 系统描述的任意形状杯体进行毛坯优化。

反向法也叫一步法。它的基本思想是通过非线性有限元分析确定初始毛坯中的节点位置，从给定的零件的形状尺寸和工艺条件出发，沿着与冲压成形过程相反的方向求解毛坯形状。已知变量是给定零件的几何形状和板料初始状态的厚度，未知变量是初始状态的形状和最终状态的厚度，目标函数为塑性势函数，求得目标函数的极值即可得到未知变量值[118]。国外已经对反向法作了大量的研究[114][119][120][121]。国内徐国艳等采用反向法计算盒形件毛料外形，开发了独立的有限元源程序。为了提高程序的收敛性，提出了一种简单快速的求解毛料初步解的方法；改善了边界条件，把压边力施加在凸缘外边缘节点上，根据通过某节点的单元边的长度调整该节点处压边力的大小[118]。

2.3.6 其它

除了上述方法外，还有几何映射方法、向后跟踪、增量/减量法等[117]。此外，上海交通大学的姚华等则提出了利用 BP 网络来预测盒形件毛坯外形[122][123]，他们指出盒形件的直边与圆角交接区域的毛坯外形是个关键。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net