第二章　盒形件拉深研究的进展

盒形件广泛应用于电子部件和汽车部件中，如电池盒、半导体盒和汽车反光镜、汽车油箱等。在实际生产中拉深件多为非轴对称形状，而盒形件是典型的非轴对称形的拉深件，在盒形件拉深过程中材料的变形较为复杂，因此以盒形件为研究对象对拉深工艺作进一步的探讨更具有实际意义。盒形件也是金属薄板拉深成形中较为典型的冲压件，其变形规律具有一定的典型性，研究这类件的成形规律，不仅对这类件成形工艺参数和工艺步骤的确定是至关重要的，同时也是进一步认识复杂件成形规律的基础。

在板料成形领域，拉深是最常用、最重要的成形方法。在目前的理论研究中，对圆筒件拉深的研究可以说已经非常成熟，现在已经有几个比较成熟的评定参数来衡量拉深件的拉深能力，比如与工艺条件相关的极限拉延比(TLDR, Technological Limiting Drawing Ratio)[80][81]等。但是，对于盒形件来说，由于成形情况较为复杂，既包括圆角部分的圆筒形拉深，又存在直边上的弯曲和拉延；另外，盒形件的应力应变状态也很难分析。因此，人们在实验研究和经验分析的基础上对盒形件的拉深成形进行了大量的研究。

2.1 成形机理

盒形件是一种非轴对称的零件，它的筒壁是由直边部分与圆角部分构成。拉深变形时，应力、应变在变形区内沿周边的分布很不均匀，而且随着零件的几何参数、毛坯形状以及拉深条件的变化，其不均匀程度也会变化[21]。此外还有板材本身的各向异性等，这些构成了盒形件拉深的一系列特点，也是盒形件拉深的难点所在。因此，人们对于盒形件的成形机理，缺陷的分析，成形极限和材料各向异向性对拉深的影响等作了大量的研究。

由于盒形件形状的非轴对称性和自身结构的复杂性，决定了盒形件成形时不同于圆筒形件最大特点就是不均匀性，这种不均匀性主要体现在以

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

下几个方面：

1) 受力分布不均匀性

盒形件拉深变形过程中，在法兰变形区，圆周部分的正应力沿切向和径向的分布、直边部分正应力沿横向和纵向的分布都是不均匀的。在已变形的直壁部分，直边区和圆周区所承受的单位载荷也是不同的。

2) 变形分布不均匀性

盒形件成形过程中变形主要在法兰区进行，而冲头的底部材料基本不变形或有少量的胀形部分。研究表明：法兰区平面内圆周区和直边区的变形程度是不同的，圆周区的变形程度大于直边区。

3) 变形速度不均匀性

一般认为：盒形件拉深成形时，直边部分的流动速度大于圆周部分的流动速度。但是，直边区和圆周区是一连续的整体，因而其位移速度场的分布也是连续的，不存在间断点。两区之间也不存在明确的分界线。

2.1.1 盒形件变形特点

杨玉英[82]从分析盒形件拉深应力——应变入手，通过与圆筒形件拉深变形的分析对比，研究了盒形件的变形特点。指出盒形件拉深时，不仅在直边部分的凹模圆角处产生弯曲变形，而且在法兰区产生切向收缩、径向伸长的变形与圆角区的变形性质基本相同。通过分析盒形件成形机理指出，盒形件变形时，变形区圆角处与直边处的金属由于位移不同而诱发的剪应力能降低圆角处传力区的轴向拉应力；由于变形区直边处产生拉深变形，使圆角处变形区的变形抗力得到降低。从而提出了盒形件成形极限高于筒形件的原因，并由试验得到了验证。她的这种观点现在已经被人们接受。

2.1.2 拉延极限

盒形件的拉延极限影响到了盒形件的拉延次数，成本等等。所以人们对盒形件的拉延极限进行了很多研究。杨玉英、张小平[83]指出凹模相对圆

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

角半径$\frac{r_d}{t}$很小时其成形极限的主要形式是壁裂极限，并就此种形式的无法兰和有法兰盒形件的初次拉深时成形极限进行了探讨，给出了零件几何参数（ $\frac{r}{B}$、$\frac{H}{r}$、$\frac{H}{B}$，H－零件高度，B－零件短边长，r－零件转角半径）及凹模相对圆角半径$\frac{r_d}{t}$，零件相对转角半径$\frac{r}{B}$，切角半径ΔC等对盒形件拉深极限的影响的定性分析。孙景芳，赵庭良[84]通过实验证明了罗氏手册中指出的盒形件在一次工序内能拉深出的最大相对高度（H/B）偏小。并指出影响盒形件一次拉深成形极限的五个影响因素——板料的塑性各向异性、模具直边部分与圆角部分的阻力不同、热效应、润滑剂、压边力等。郑晓丹[85]等提出了应用专家系统进行盒形件拉深极限的分析，并对专家系统的关键技术进行了详细阐述。

2.1.3 应力状态

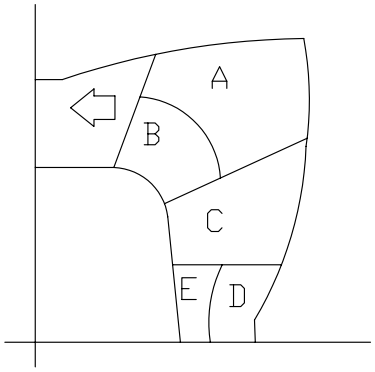


图 2-1　凸缘应力分区

熊志卿[86]根据筒盒拉深的变形特点，假设法兰变形区的剪应力仅为与周向坐标有关的函数，对不同变形区，分别解平衡微分方程或将平衡微分方程与塑性条件联解，获得常见筒盒(圆筒、矩形盒、方盒、长圆盒、多边形盒、三角形盒)拉深法兰变形区应力分布通式。此外，他还探讨了盒形件拉深极限的表达及确定方法。朱谨[87]根据刚塑性有限元的计算结果，将凸

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

缘划分为图 2-1 所示的五个不同的变形区域——刚性区（A）、主要变形区（B）、剪切变形区（C）、增厚区（D）、厚度近似不变区（E）。由于 C 区域内的质点也具有一定的 y 向速度分量，牵引材料从角部穿过 C 区域向 D 所在直边区域流动，导致 D 区域增厚，而角部 B 区的变形程度有所减弱。这种现象就是“ 应变松弛效应 ”，其强度随角区周向压应力的增强和 C 区域内 y 向速度分量的增大而增大。此外，他通过实例计算证明了凹模圆角的相对半径是工艺设计中的一个重要参数，它对变形过程中“ 应变松弛效应 ”的大小有很大影响。

2.1.4 板料各向异性对成形的影响

经预加工或轧制而成的金属板料呈现明显的面内各向异性，并对板料在成形过程中的起皱和凸耳现象具有显著影响。板料成形数值模拟的精度在很大程度上取决于能否真实反映板料变形的力学行为。因此，能够更准确地反映板料各向异性本构关系的研究和应用受到广泛关注[88]。柳泽，傅沛福，李运兴，寇淑清给出了用三参数 Barlat-Lian 各向异性屈服函数有限元数值模拟盒形件拉深过程的结果，给出了各向异性系数 R 对耳状法兰边的形状影响及成形高度、厚度变化，薄板法兰边起皱等结果[89]。Y.Q. Liu，J.C.Wang，P. Hu[90]基于离散的 Kirchhoff 的三角形壳体单元模型的弹塑性大变形有限元公式对有强的各向异性钣金在拉深过程中的法兰凸耳现象进行了数值模拟。倪向贵[88]等以模拟方形盒的拉延过程为例，分析了不同的屈服准则在板料成形过程数值模拟中的应用。

2.1.5 成形过程

人们已经对盒形件在理论分析和实验研究等方面作了大量的工作，但因其变形的复杂性，还不能像轴对称件那样得出较为成熟的分析理论。随着有限元软件的日臻完善和计算机技术的飞速发展，采用数值模拟的方法来研究盒形件的成形规律已变成一个重要方向。大量文献证明，成熟的有限元软件模拟结果与实验数据吻合得比较理想，因此，弹塑性有限元模拟

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

结果越来越被接受[91][92][93]。王凤琴[93]使用 ANSYS 有限元软件，采用计算精度较高的静力隐式算法，对盒形件的成形过程进行数值模拟。考虑到几何尺寸的对称性，取 1/4 模型。网格划分时，采用比实体单元、速度精度都高的壳单元划分网格。材料取 ST13，凸凹模大小采用实验模具相同尺寸，采用双线性各向同性硬化模型。通常认为，直边的收缩变形是因圆角区而引起的，故圆角区的变形最大。其实不尽然，模拟结果显示法兰区变形大小与毛坯外形紧密相关。

此外，在文中王凤琴还总结了各种形状的毛坯成形盒形件的特点。法兰起皱和侧壁破裂是盒形拉深件的主要失效形式，通常由金属材料变形程度过大和变形不均匀所致。在相同模具、相同成形条件和相同材料性能的情况下，方形毛坯最易发生侧壁破裂，而且在法兰直边区易起皱；圆形毛坯虽然侧壁最不易破裂，但在法兰圆角区最易起皱。八角毛坯变形相对较均匀，并且可以通过调整切角量大小和修边(平滑切角尖角的轮廓线)来改善成形质量。郑晓丹[94]等通过探针法来获取各种情况下不同部位的摩擦系数，进而分析出方盒件的成形特点，并分析出各种工艺参数与材料参数对成形时摩擦的影响规律，有助于在实际生产中对摩擦状况进行控制。

2.2 工艺研究

由于盒形件拉深过程的复杂性，目前，人们针对此工艺过程及相应的参数调整及控制进行了大量的实验研究和模拟分析。为进一步理论指导及实践应用提供了依据。

2.2.1 压边力控制

在板料拉深成形过程中，通常需要压边装置产生足够的摩擦抗力，以增加板料中的拉应力、控制材料的流动、避免起皱。压边力(blank holding force，BHF)的大小是板料成形中重要的工艺参数，也是板料拉深成形中的重要控制手段。一般来说，压边力过小，无法有效地控制材料的流动，板料很容易起皱；而压边力过大，虽然可以避免起皱，但拉裂趋势会明显增

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