加；同时，模具和板料的表面受损可能性亦增大，影响模具寿命和板料拉深成形质量。在生产实际中，为了提高生产率，或者因为产品的表面质量要求较高，要求尽可能一次成形，这样压边力参数的合理取值、调整和控制，则成为控制金属流动、防止出现起皱和破裂的最重要的手段之一。事实上，大型覆盖件的调模过程，主要就是以压边力为主的一系列工艺参数的调整过程以及模具参数的调整过程。随着设备的更新和计算机控制的进一步推广和应用，拉深成形变压边力控制技术不仅在汽车行业可能得到应用，在机电、航空以及轻工等诸多领域中也同样具有着广泛的应用市场[52]。因此，人们对盒形件拉延中的压边力控制进行了大量的研究，以期找到更好的盒形件拉延的压边力控制方法，并进一步得出汽车覆盖件的压边力的控制方法。在实际设计中采用的压边方法，大都采用整体压边，即采用一个压边圈，对整个法兰区的金属进行压边，这样由于变形后各个部分的板坯厚度发生了变化，实际上压边圈只是对法兰区的部分区域起到了压边作用。显然，即便采用了常力压边方法，其压边效果也不是很理想。

秦泗吉[95]对盒形件拉深成形，提出了在周向多个位置施加压边力的方法，且根据常力压边原理，用弹簧和橡胶作弹性元件，可根据需要在不同位置施加不同的压边力，且每个位置的压边力在拉深过程中保持定值。以此设计的模具所提供的压边力，更适合复杂零件的成形，也更符合拉深工艺对压边力的要求。

大型覆盖件成形的主要问题是毛坯悬空部分的起皱与破裂，对该部分毛坯的正确而有效的控制主要通过压料面来实现。因此压料面是覆盖件成形中的工艺要素。哈尔滨工业大学的杨玉英、徐伟力、邢忠文[96]实验研究了压料面形式对方盒形件拉深变形的影响，得到平面、凸球面、凹球面形状压料面对成形力、成形极限、应变分布的影响规律。三种压料面下毛坯受力如图 2-2 所示。当采用凹球面作为压料面拉深时，变形阻力大为减小，当 $\alpha > \arctan(2\mu)$ 时，流动阻力 f_b 小于零，反而变成了变形拉力，于是产生变形所需径向拉应力也变小，从而使凸模圆角处这个危险断面的应力强度得以减轻，因此拉深力较小，成形极限较高。另外，f'_b 小于零，随着 α 的增大，f_b 减小。由几何关系易知，圆角区和直边区，距凹模口等距离处，圆角区的 α 角要大于直边区，故圆角区的变形阻力要小于直边区相应处，

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

于是直边区、圆角区的变形阻力的差异缩小，变形较均匀，相应诱发剪应力比平面压料面时也就较小。

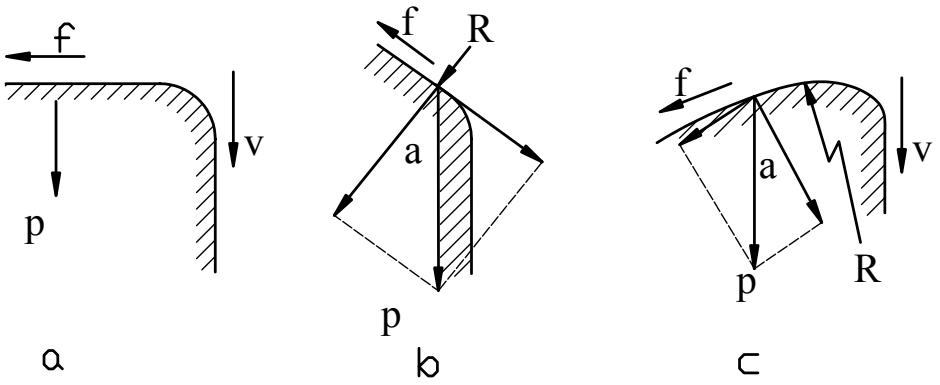


图 2-2　毛坯在三种压料面下的受力示意图

a)平面压料面；　b)凹球面压料面；　c)凸球面压料面

2.2.2 拉延筋

上海交通大学的杨建华[97]等针对理论计算拉延筋抗力的复杂性，借助一套拉深实验测试系统，以盒形件拉深过程为研究对象，提出了一种通过实验方法简便测试拉延筋抗力的方法，即通过测定有、无拉延筋前后的总拉深力可以简便地计算出拉延筋抗力的大小。将实验结果与数值模拟结果进行了对比计算，表明试验方法得到的结果与 DYNAFORM 有限元软件进行数值模拟的结果相吻合。

2.2.3 板材对成形的影响

上海交通大学的郑晓丹，汪锐，何丹农[85][98]总结了盒形件拉深工艺的经验和理论研究，应用人工智能技术建立了基于盒形件拉深极限的选材专家系统。因为盒形件拉深比圆筒件拉深更接近于实际生产，故这在工厂的实际应用中具有更广的实用价值。传统的评价板料拉深性能的理论和实验研究都认为板料拉深性能仅跟材料本身基本力学性能参数有关，这样一来，板料性能参数仅仅可以作为在某一固定工艺条件下不同材料之间的横向比

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

较标准，而没有对实际生产提供真正的指导作用，因为不同的工艺条件对板料性能有不同的要求。因而他们认为应该将板料拉深性能与成形工艺条件有机的结合在一起。鉴于此，为了达到推理选材的目的，在专家系统中需要从材料库中提取相应的材料参数以及从用户输入信息中提取相应的工艺参数，这其中材料参数包括板厚方向性系数(R)、硬化指数(n)、材料常数(K)、屈服强度(σ_s)、断裂强度(σ_b)，工艺参数包括单位面积压边力(p)凸模圆角半径(r_p)、凹模圆角半径(r_d)、摩擦系数(μ)、凸模宽度(B)、模具间隙(Δ_t)、坯料半径或宽度(r 或 B_0)、板料厚度(t_0)。

盒形件的拉深属于非旋转体拉深。由于这类零件形状各异，没有一定的规律可循，在确定毛坯形状和尺寸时很难找到恰当的经验公式来应用。所以在加工该类零件时，毛坯的形状和尺寸一直很难确定。而盒形件毛坯尺寸确定的精确与否对工件的成形质量具有重要的影响。如果毛坯的尺寸选的过小，拉深出的工件的高度过低，不能满足图纸的要求；如果毛坯尺寸选的过大，有可能由于毛坯尺寸过大导致拉深力太大，而使本来能拉深成功的零件被拉裂；如果毛坯的形状和工件要求的形状误差太大，那就会由于毛坯形状的差异而引起变形的不均匀，这样就有可能拉裂，也有可能起皱。总之，毛坯形状和尺寸精确与否非常重要，处理不好最终都会使工件报废，严重影响生产。

此外，材料费用常在钣金零件总费用中占主要部分，从零件上切除的材料愈少则废料就愈少。所以对拉延件预测合理的毛坯形状可以减少材料费用，提高钣金件的试制费用，减少试制时间，从而提高生产率，降低生产成本。对于毛坯尺寸外形的确定的研究情况将在下一节中详细介绍。

2.2.4 组合工艺参数

Yasuo Marum, Hiroyuki Saiki[99]研究了组合工艺参数（毛坯形状、模具形状、毛坯材料和冲头润滑）对盒形件可拉深性的影响。介绍了估计可拉深性的特征力曲线。基于力曲线、杯体断裂形式和厚度应力分布讨论了组合的工艺参数对可拉深性的影响。此外，从力曲线中可以很容易估算出极限拉延比。定义了恒定断裂力和过渡断裂力。使用断裂力估算了可拉深性

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

提高的程度。

在金属板料成形中，板料的成形过程受到材料参数、工艺参数、板料尺寸等众多因素的影响，其中材料参数主要包括材料的抗拉强度 σ_b、屈服强度 σ_s、应变硬化指数 n、各向异性指数 r 等，工艺方面的参数主要是指冲压速度、压边力的大小和分布、拉延筋的形态和分布、成形的润滑情况等。上海交通大学的谢汐、孙成智、张卫刚通过正交试验和计算机数值模拟相结合，主要就材料的典型参数和工艺方面的润滑情况对板料成形性能的影响进行研究。并用该最优数据进行实际冲压，得到的结果与最优模拟结果比较吻合。

2.2.5 成形过程

板料冲压成形过程的有限元分析是板料成形理论、材料力学、计算数学、计算力学、冲压工艺和计算机科学等多门学科综合的技术。它是利用这些理论与知识在计算机上进行板料成形过程的定量分析和模拟，以此代替实际的试模，并预测在模具设计中潜在的缺陷，为模具设计人员和工艺员提供修改或重新设计工艺方案和模具的科学依据，最终实现质量佳、成本低的模具产品，为企业带来高的经济效益。这种虚拟制造技术随着软硬件技术的发展愈来愈受到制造和模具行业的重视。在西方发达国家，这种高新技术在实际生产中已广泛应用，并为企业带来了巨大的经济效益，许多企业已离不开它。国内与国外存在较大差距，目前还属起步阶段。北京航空航天大学的陈中奎，施法中，黄迪民[100]自主开发了板料冲压成形过程有限元分析原型系统。该原型系统有方便灵活的建模功能、有效分析计算能力、直观形象的后置处理和数据可视化功能。他们还对各种实例进行了模拟分析，取得了相符的结果。该原型基本能模拟类似车门的中等复杂程度汽车覆盖件的成形过程。

此外，近几年对盒形件的工艺研究还有多轴载荷盒形件的拉深和多次拉深等。有大的方向比的盒形和椭圆形杯体在电子部件比如电池盒、半导体盒和晶体振荡器中应用广泛。同时，这种杯体的需求正在增加，设计技术和制造仍然需要提高以减少研制周期和提高生产率，这些产品必须使用

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

多次拉延工艺。Se-Ho Kim，Seung-Ho Kim，Hoon Huh 对有大的长宽比的多次拉深进行了反向有限元分析[101]。由于多次拉深的复杂性和收敛性，使得对多次拉深工艺的过程进行直接数值分析相当困难且需要大量的计算时间。而反向法分析有助于增强从目标形状获得毛坯形状，并能以少量的计算时间获得最终形状的厚度和应力分布。他们将反向有限元分析应用于多次拉深工艺，并得出了每个中间形状的厚度应力分布和中间模具的形状。在多次拉深过程中，与传统的拉深过程相比，毛坯材料在每个阶段经受了额外的复杂变形。一般来说这个工艺中产生了额外的弯曲、松驰、拉伸、压缩和在接下来的拉深中的不同拉延比的剪切力。由于变形机理非常复杂，很难预测最终的机械性能，因此对制造出指定形状和材料特性产品的工艺设计并不容易。有鉴于此，他们对大方向比的盒形件的拉延过程设计的多次拉延工艺进行了有限元分析。利用 LS-DYNA3D 将弹塑性有限方法的壳体单元和显式时间积分方案组合在一起，对成形中的失效如拉裂和起皱进行了完全的模拟[102][103]。分析结果显示了在截面上拉延比的不同产生了非一致的金属流动，这样导致了起皱和严重的延伸。在毛坯和模具之间的不规则接触条件也诱发了不一致的金属流动。在文献[102]和文献[103]中他们推荐了一个工艺设计和模具形状更改的准则。T.W. Kua, B.K. Ha[104]等专门对有极限拉延长宽比的高精度盒体的多次拉深进行了有限元分析。分析结果显示毛坯和模具之间的不规则接触条件影响了失效的产生，在拉深部位的不同的长宽比导致了不一致的金属流动，这种不一致的金属流动将会导致失效。他们对盒形件的多次拉深过程进行了一系列的实验。通过和数值分析结果的对比，研究了拉深出的盒形件的变形轮廓和厚度分布。

Eiji Sato, Toru Shimizu 等提出了冲头和四个侧边模具的多轴载荷下的盒形件拉深工艺。并采用有限元[105]和实验方法[106]对此工艺进行了分析证实。结果表明此方法相比传统的拉深方法能提高极限拉延比，并能获得更加好的厚度分布。

2.3 毛坯外形及尺寸的确定

在拉深过程中，盒形件的四个圆角部位的变形与圆筒形件材料变形相

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