在板料成形过程中，经常设置拉延筋来控制材料的流动方向，增加变形阻力，防止起皱、破裂、表面扭曲、回弹等现象的发生。随着现代制造技术的发展，板料冲压成形的有限元模拟已成为模具设计与制造的关键技术。在有限元模拟中精确模拟拉延筋的影响比较困难，主要是因为拉延筋尺寸较小，形状复杂。要精确考虑板料与拉延筋的接触，则必须将拉延筋曲面划分成非常细小的单元网格，这会大大增加计算工作量，同时对模具几何形状的修改也极其不利，因此这种做法是不现实的。目前通常的做法是采用等效拉延筋模型，将拉延筋复杂的几何形状抽象为一条附着在模具表面能承受一定约束力的拉延筋线。这就需要计算单位长度的拉延筋需要承受的拉延筋约束阻力。

拉延筋约束阻力的计算方法主要有两种：一是单独对拉延筋进行有限元模拟，该方法可以较直观的反映板料在拉延筋处的变形过程；另一种方法是解析方法，该方法根据塑性力学理论并进行必要的简化，推导出约束阻力的计算公式，它简单迅速并且不会遇到有限元方法中的诸多难题，计算精度也可达到要求，因此具有一定的优越性。Wang 最早根据平面应变假设推导出一个拉延筋计算模型。Stougto 考虑了应变率敏感性质，采用能量平衡原理推导出了一个相对完善的拉延筋阻力计算公式。Serdar 对 Weidemann、Kluge 和 Stougton 解析方法的计算精度进行了比较。李大永采用平面应变假设并考虑材料的各向异性、应变速率敏感性和包辛格效应提出了一种约束阻力计算模型[4]。徐丙坤、施法中根据虚功原理和对板料在拉延筋处变形的分析，得到平均外力的计算公式，然后参考 Levy 方法提出了一种计算拉延筋约束阻力的参数拟合公式，并根据试验得到参数值。公式中考虑了材料的各向异性和应变速率敏感性。通过将计算结果与 Nine 的试验结果进行对比，证明了该计算方法对各种材料的有效性。由于拉延筋尺寸较小、形状复杂，在数值模拟中要精确考虑板料与拉延筋的接触则必须将拉延筋模型划分成非常细小的网格，这会增加很大的计算量。因而这种方法是不可行的[4]。徐丙坤，施法中参考国内外有关资料的基础上，建立了一种等效拉延筋模型。模型中考虑了拉延筋约束力、塑性厚向应变以及垂直于压料面的约束保持力的影响，并在程序中予以实现[5]。吉林大学的朱勇建[6]等结合板料冲压计算机模拟的实际情况，改进了李东升等人提

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

出的拉延筋约束力求解模型。在板料成形模拟过程中采用弹塑性本构方程，推导出了塑性状态下应力应变关系。考虑厚向各向异性、应变率、弹性力和应变硬化的影响，根据平面应变假设采用弹塑性幂次强化模型求解拉延筋约束阻力。李淑慧[7]等建立了改进的等效拉延筋阻力模型，此模型能够真实地反映板料通过拉延筋时的摩擦和弯曲/反弯曲阻力。

对于拉深时的成形极限在最近也有新的进展。邓陟，王先进[8]对金属薄板在单向拉伸和双向拉伸状态下的应力应变关系进行了理论和实验研究，给出了两种应力状态下所得 n 值的相关性，分析了其预报成形极限的适用性。郭乃成[9]根据上限原理建立了一种变薄拉延过程的上限模型，其中包含两个准独立参数，可以通过最优化，获得变薄拉延过程的最佳上限解。同时研究了主要工艺条件对变薄拉延力和筒体拉应力影响的规律，并对变薄拉延的最佳半锥角和极限拉延系数进行了深入探讨。所得到的结果对设计变薄拉延用模具和制定合理工艺参数有指导意义。王东哲[10]等总结了板料成形中圆筒件极限拉延比(Limiting Drawing Ratio， LDR)求解的若干影响因素，分析了对 LDR 影响较大的各向异性指数、硬化指数、拼合板坯以及拉延工艺流程等因素，为今后本领域工作的开展指出了可能涉及到的问题。

二十世纪 70 年代中期以后，日本学者对板材液压成形工艺进行了较为细致的试验研究，提出了一些抑制破裂等成形缺陷的措施，使充液拉深工艺在日本进入了实用阶段，广泛用于反光罩、航空部件及汽车覆盖件的生产。充液拉深工艺在不断发展中形成了多种新工艺：周边径向加压充液拉深和周边径向加压反向再拉深、充液拉深与内缘翻边的复合工艺、充液变薄拉深、有反向预胀形的充液拉深、内高压板料成形、普通拉深与液压成形的复合工艺等[11]。在国内，王保华[12]等研究薄板充液拉深失稳的临界条件及失稳起皱对拉深件质量的影响，提出克服法兰变形区失稳起皱的措施，为充液拉深工艺设计提供理论参考。

李东升，周贤宾[13]研究了双曲扁壳覆盖件的成形机理及回弹特点，分析了双曲度拉延回弹机理。讨论分析了压边力、板材性能参数等因素对双曲度回弹的影响。

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

1.2.2 计算机技术在拉延中的应用

随着电子、计算机技术的发展及其价格的平民化。信息技术渐渐地发挥了其在生产应用中的潜力。人们也渐渐将计算机、电子技术应用于拉延中。降低了生产成本、缩短了产品的开发周期。此外，由于计算机的强大计算能力，也使得人们可以使用计算机来完成原来不能进行的分析计算工作，为理论研究及应用提供依据。

参数化建模、特征组装配建模技术在覆盖件的拉延模具设计及分析中均有应用[14][15][16][17]。在汽车覆盖件的冲压方向、翻边展开、工艺补充面、压边面及拉延筋设计中普遍使用了 CAD 技术进行设计[18][19][20]。

计算机的计算能力更多的体现在应用计算机进行模拟分析、仿真及工艺优化上。李东升[21][22]进行了汽车覆盖件拉延筋约束力的模拟计算，徐丙坤[5][23]、王光辉[24]、胡金华[25]等人运用有限元数值分析方法，分别对拉延筋进行了建模、计算、分析和模拟。目前，已能对较复杂的拉延工艺建立计算模型进行仿真，在一定程度上预测起皱、回弹、破裂等现象的发生，并能对模具设计和相关工艺参数提出定量的指导建议[26][27][28][29]；遗传算法，神经网络、模糊控制的应用、专家系统等人工智能技术也开始应用于拉延成形的各个工艺过程中了[30][31][32][33]；计算机技术在较难的工艺参数如抛物面零件拉延成形的工艺参数、液压拉深工艺参数的选择优化上发挥了很大的作用[34][35][36][37]。

1.2.3 拉深的工艺研究

对于拉深工艺的研究主要集中于大型件及复杂拉深件的拉延工艺及模具的研究上。陈吉平，丁智平[38]通过实例说明了确定不对称拉延零件合理工艺方案的重要性，同时介绍了模具结构特点及工作过程。刘鲁镅提出了板料轴对称拉延中的应变预测系统[39]。刘罡[40]等进行了薄板拉延成形的固定压边间隙控制方式的研究。邓明[41]，杨占尧[42]分别对拉延中的润滑、发热升温对工件的影响等进行了探讨。陈关龙[43]则分析了各种结构形式的拉延筋、拉延筋的几何形状和参数对拉延阻力分布的影响，以及拉延阻力分

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

布状况对覆盖件拉延成形过程中金属流动的影响，提出了覆盖件模具中拉延筋设计的基本准则。朗利辉[44]等就板液压成形技术原理、数值模拟技术和分类进行了研究，探讨了此种技术的发展趋势，介绍了基于板液压成形技术的无模充液拉深技术，并利用实验和数值模拟方法对此技术进行了分析，验证了此项技术的可行性。

1.2.4 拉深的装置研究

对拉延装置的研究主要集中于压边装置的设计、运动机构的设计优化[45][46]及充液拉深装备。

板料拉深中最容易出现的质量问题是起皱，为消除起皱，除了从零件形状、拉深工序安排、冲压条件以及材料特性等诸方面进行考虑外，最主要的还是应从模具设计上采取措施，如采用适当的压边装置来消除起皱。张松青[47]以恒力压边装置、适力压边装置、无压力浮动压边装置及用液压机顶出缸压边等为例说明拉深模压边装置的设计。秦泗吉[48]将常压边力的设计原理用于液压拉深模的设计中，采用这种结构，可使拉深过程中的压边力一直保持不变，不仅使液压成形更容易在单动压力机上实现，且能达到用力控制压边效果的目的，可提高拉深成形极限，或生产出更加复杂的制件，最大可能地发挥液压拉深成形的优点。杨连发[49]总结了以前的几种压边方法并作了比较和评论。于维[50]提出了在双动油压机上实现理想压边力的方案。秦金莲[51]通过对拉延过程中拉延力及压边力的分析，指出目前拉延模具中压边装置的缺陷，进而设计了伺服式液压压边拉延模具的结构，打破了单动压力机不能作深拉延的常规。国外对于压边力的研究中已经使用了数值模拟和人工智能技术[52]。康达昌[53]开发研制了一种新型超高压通用充液拉深装备。李天佑[54]通过建立的液压拉深中的液体压力——行程曲线对成形过程进行了很好的控制。郭斌[55]等系统地研究了平底和球面圆筒形件充液拉深成形精度。

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

1.3 液压拉深技术的发展及现状

如今拉深技术已经广泛应用于金属板材的成形过程中。拉深工艺能用于生产中成形圆筒形件、阶梯圆筒形件、锥形件、球面零件等各种复杂的曲面零件。对于普通的圆筒形件，人们甚至已经依据经验和理论研究得出了极限拉深比、拉深成形所需的次数等[1]。然而，由于传统的拉深工艺采用刚性模具，容易引起起皱、拉裂等缺陷。以前广泛采用在反复试验的基础上控制压边力[49][50][51][52][56]，调节摩擦的相关输入参数比如润滑剂、润滑量[41]和改变板材金属的表面微结构，修改模具等方法来避免这些缺陷。这些措施延长了产品的开发周期，增加了生产成本。

液压拉深成形是一种特殊的拉深工艺，它克服了传统拉深的刚性模具带来的缺点。在液压拉深中用弹性体代替了刚性模具。因此，除了可以大大降低摩擦力外，还可以避免因制造非对称的、几何形状复杂的模具带来的困难。已经有研究表明液压拉深成形可获得更高的拉延比（LDR）。此外，沿筒壁的应力分布也更加均匀，Anwar Kandil 通过实验的方法，对拉深的主要影响因素，如初始压力、板材厚度、板材材料属性、冲头几何形状、冲头载荷和拉延比进行了研究，进一步从实验证明了通过液压拉深可以获得比普通拉深工艺更大的 LDR[57]。

1.3.1 拉深成形原理

液压拉深技术是利用液体介质来代替原来的刚性模具（凸模或凹模）进行拉深。充液拉深是液压拉深技术中的一种，这种方法在凹模中充以液体，当凸模下行时压迫该液体产生压力将板坯紧紧地贴在凸模上，这样在毛坯和冲头之间产生了摩擦力，形成有利于成形的“摩擦保持效果”；同时由于压力，液体可以从板料法兰与凹模之间溢出，减少了法兰和模具之间的有害的摩擦阻力，形成“溢流润滑效果”。对于充液拉深还有初始的拉伸效果（在模具凸缘部分的附近存在由于预胀形引起的拉伸，厚度因而变得更加一致：通过使用预胀形，模具型腔上方的材料开始的时候已经被拉伸了，产生一个更加均一的厚度分布）。基于上面的效果所以产生了阻止断裂

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