

DOI : 10.3901/JME.2015.08.020

板材液压成形技术与装备新进展*

苑世剑^{1,2} 刘 伟^{1,2} 徐永超^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院 哈尔滨 150001 ;
2. 哈尔滨工业大学金属精密热加工国防科技重点实验室 哈尔滨 150001)

摘要 : 随着板材零件向大尺寸、薄壁、深腔、复杂曲面以及难变形材料方向发展,具有低成本、高柔性的板材液压成形技术在航空、航天、汽车等制造业受到高度重视,并面临新的机遇和挑战。介绍板材液压成形技术的发展现状,重点介绍近年发展的径向主动加压充液拉深、预胀充液拉深、正反向加压充液拉深、双板成对液压成形和热态液压成形技术。分析国内外板材液压成形技术在汽车、航空航天等领域的应用现状,综述板材液压成形装备的研制进展,介绍正在研制的世界上最大的吨位为 150 MN、液体容积为 5 m³ 的液压成形装备,对板材液压成形技术的发展趋势进行展望。

关键词 : 板材液压成形 ; 充液拉深 ; 拉深比 ; 起皱 ; 成形精度 ; 曲面件 ; 车身覆盖件

中图分类号 : TG394

New Development on Technology and Equipment of Sheet Hydroforming

YUAN Shijian^{1,2} LIU Wei^{1,2} XU Yongchao^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001;
2. National Key Laboratory for Precision Hot Processing of Metals,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract : With the development of sheet metal parts on large size, thin-wall, deep cavity, complicated curved-surface and hard forming materials, the manufacturing industries, such as aviation, aerospace and automobile industry, have paid more attentions to the low-cost and high flexible sheet hydroforming technology, which is up against new opportunities and challenges. The state-of-the-art of sheet hydroforming technology is introduced, and the new developing technologies, including hydromechanical deep drawing with independent radial hydraulic pressure, pre-bulging hydromechanical deep drawing, hydromechanical deep drawing with double-side hydraulic pressures, double sheets hydroforming and warm sheet hydroforming, are presented in detail. The current application statements of domestic and foreign on the domains of automobile, aerospace and others are summarized, the progress of R&D on sheet hydroforming equipments are reviewed, and the words' largest sheet hydroforming equipment with tonnage of 150 MN and liquid volume of 5 m³ is introduced, the development tendency of sheet hydroforming technology is prospected.

Key words : sheet hydroforming ; hydromechanical deep drawing ; deep drawing ratio ; wrinkling ; forming precision ; curved-surface part ; auto-body panels

0 前言

随着环境污染、能源危机、资源枯竭等社会问题的日益突出,以及在高效率、低成本、柔性化为制造目标的需求下,板材零件向大尺寸、薄壁、深腔、复杂曲面以及难变形材料方向发展已经成为汽

车、航空航天等诸多领域的重要发展趋势^[1-3]。例如,铝合金车身覆盖件在奥迪、宝马、奔驰等高档轿车中逐步获得更多应用^[4],直径 5 m 以上的整体式燃料推进剂贮箱将进一步提高大型运载火箭的有效载荷和可靠性^[5]。

传统板材成形技术面临更大挑战。在复杂曲面件成形方面,传统板材成形技术存在成形性差、工序复杂、模具费用高、尺寸精度低、废品率高、组织损伤等问题,严重影响零件的质量和可靠性^[6]。针对传统成形技术存在的问题,国内外先后发展出

* 教育部长江学者和科技创新团队发展计划(IRT1229)和国家自然科学基金(50905041, 51375114)资助项目。20140619 收到初稿,20141009 收到修改稿

许多新颖、独特的板材成形技术。其中, 板材液压成形技术由于具有成形极限高、道次少、尺寸精度高、工艺可控、制造成本低等优点, 在高精度、复杂形状、薄壁曲面件的成形方面显示出巨大的潜力, 并成为塑性加工领域的研究热点之一^[7]。

不同于传统板材成形方法, 板材液压成形技术基于高压流体技术、传动密封技术和伺服控制等技术, 由于高压液体容积大、流速高、控制参数多等特点, 造成系统实时控制复杂, 大型装备制造难度极大; 同时, 由于成形压力高、工艺参数多、加载路径复杂, 板材变形特点和变形机理不同于传统板材变形理论, 板材处于复杂应力场, 厚向应力不能忽略; 此外, 由于板材、流体、模具之间的流体-固体界面行为复杂, 相互影响, 相关板材液压成形理论还在不断探索中。本文综述了板材液压成形技术的最新进展, 探讨了国内外成形装备的研制和应用现状, 并对板材液压成形技术的未来发展趋势进行了展望。

1 板材液压成形技术发展现状

板材液压成形采用液体介质(油、水和特殊流体介质)代替刚性模具传递载荷, 使板材在液体介质的压力作用下贴靠凸模或凹模, 通过控制流体介质的压力和压边力使板材成形为所需形状的曲面零件^[8]。按照液体的作用形式不同分为充液拉深和液体凸模拉深两大类, 如图 1 所示, 其中 F_c 为合模力, p 为液室压力。

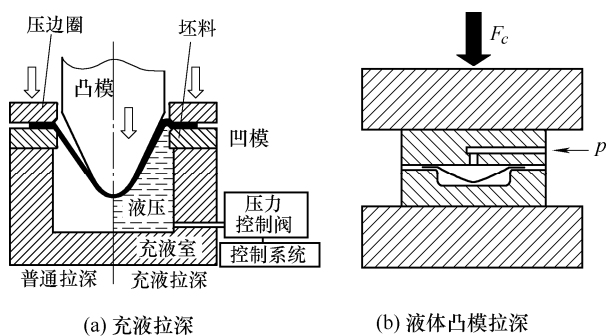


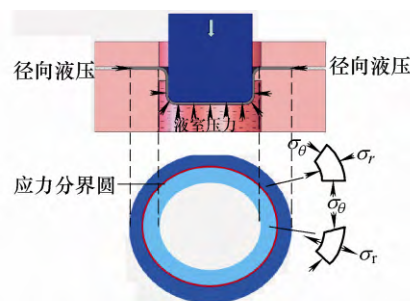
图 1 板材液压成形技术分类

近年来, 旨在进一步提高成形极限和零件复杂性的板材液压成形新技术不断出现, 如径向主动加压充液拉深、预胀充液拉深(正胀、反胀、局部胀)、正反向加压充液拉深、双板成对液压成形和热态液压成形等; 适用材料由低碳钢、不锈钢进一步扩展到高强钢、铝合金、镁合金等。

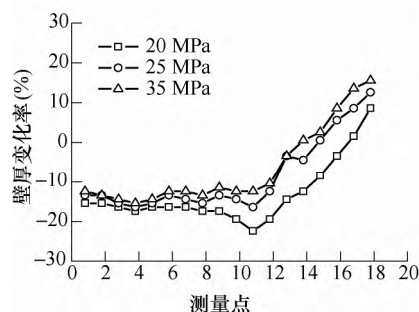
1.1 径向主动加压充液拉深

不同于传统周向加压充液拉深, 径向主动加压

充液拉深是在成形坯料的法兰外缘施加独立、可控的径向液压, 径向液压不受液室压力的限制, 可根据变形材料、成形极限优化控制, 增加了工艺可控性, 适合极限拉深比达到 2.5 以上的铝合金、低碳钢、不锈钢等深筒形件成形^[9]。实现径向主动加压的充液拉深设备需要配置两台增压器和加压控制系统。径向主动加压充液拉深可使法兰区坯料产生一个明显的径向应力分界圆, 如图 2a 所示, 其中 σ_r 、 σ_θ 分别代表径向应力和环向应力。随着径向液压增加, 分界圆的位置逐渐向凹模口移动, 从而使危险断面的拉应力降低, 壁厚减薄率明显改善, 如图 2b 所示。此外, 坯料在双面流体润滑作用下, 板材的承载能力进一步提高, 成形极限提高^[10]。例如, 在 35 MPa 径向压力下, 成形出极限拉深比 2.8 的 5A06 铝合金球底筒形件^[11], 如图 2c 所示。



(a) 工艺原理及径向应力分界圆模型示意图



(b) 筒形件壁厚变化率分布



(c) 球底筒形件

图 2 径向主动加压充液拉深

1.2 预胀充液拉深

随着双相(Dual phase, DP)钢、相变诱发塑性(Transformation induced plasticity, TRIP)钢等高强钢板的应用, 普通拉深存在变形不均匀、不充分的问题, 无法充分发挥材料的应变硬化性能^[12]。预胀充液拉深可以在拉深变形前通过预胀变形提高板材的应变硬化量, 使零件成形后获得足够的刚度、强度、抗弯、抗凹等性能, 原理如图 3 所示, 该工艺适合航空航天领域贴模度 0.25 mm 以下的复杂曲率铝合金整流罩、头罩等以及汽车发动机罩、顶盖、外门板等覆盖件成形。例如, 通过控制板材的反胀高度

和形状,改善了车身发罩和顶盖的整体变形均匀性,提高了抗凹性^[13]。针对反胀对板材变形的调节能力有限以及存在折叠缺陷的问题,文献[14]提出采用正胀充液拉深成形 DP590 钢板平底筒形件,底部硬度比反胀充液拉深增加 9%,整体等效塑性应变差降低 19%,提高了零件整体变形硬化量及变形均匀性,如图 4 所示。针对反胀和正胀充液拉深均无法实现复杂曲面件变形控制的问题,文献[15]进一步提出局部胀形充液拉深法,使曲面试件底部硬化面积率达到 81%,比普通充液拉深提高 68%。

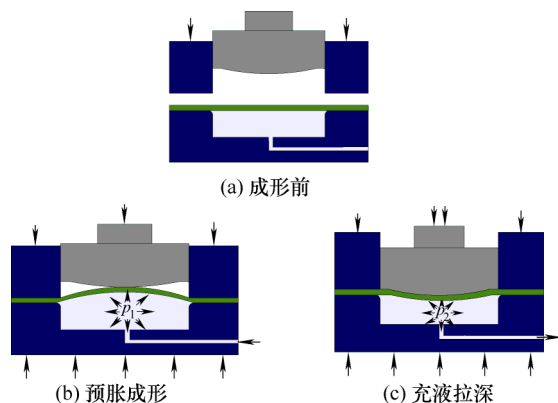


图3 预胀充液拉深工艺原理示意图

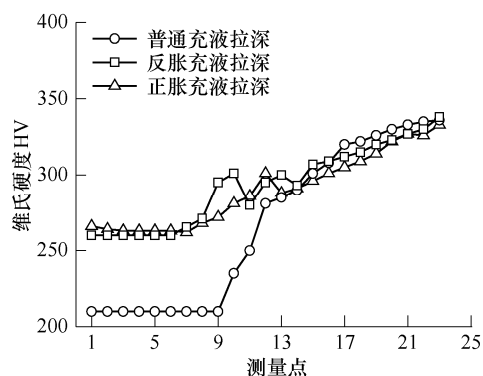
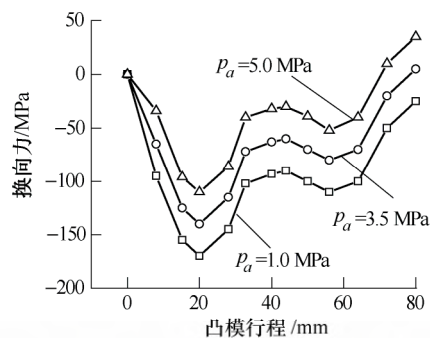


图4 曲面件预胀充液拉深硬度分布

悬空区反胀对控制相对厚度小于 3% 的球形、锥形、抛物线形以及复杂曲面件成形时的悬空区内皱十分有效,通过预胀产生的应变硬化效果提高了悬空区板材的抗皱能力并减小了悬空区板材的面积,更重要的是通过预胀可以减小悬空区的切压应力并使切应变分界圆由曲面向凹模口移动^[16],如图 5 所示。文献[17]通过预胀充液拉深解决了 2A12 铝合金曲面件内皱的难题,如图 6 所示。

1.3 正反向加压充液拉深

为了进一步提高成形极限,同时避免悬空区的反胀破裂问题,在施加液室压力(反向液压 p_1)的同时,在板材的上表面同时施加正向液压 p_2 ,即正反向加压充液拉深,适合高径比达 1.2 以上的深筒形件、薄壁曲面件及低塑性铝合金复杂件成形^[18],工



(a) 预胀压力对换向应力的影响

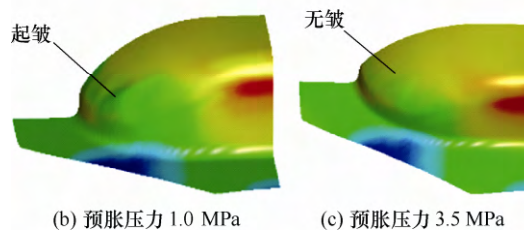


图5 预胀压力 p_a 对曲面件悬空区内皱的影响

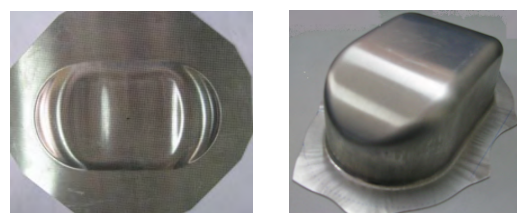


图6 曲面件预胀充液拉深成形

艺原理如图 7 所示。正反向液压同时加载时,板材处于明显的三向应力状态,静水压效果增强,传力区板材承载能力提高,拉深比进一步提高^[19];通过调整正反向压力比 $\lambda (\lambda = p_2/p_1)$,可以实现对壁厚分布的有效控制。如成形锥底筒形件,随着正反向压力比增大,壁厚不变线位置沿筒壁向筒底方向移动,壁厚减薄区面积减小^[20],如图 8 所示,其中 $d\varepsilon_z$ 、 $d\varepsilon_\theta$ 和 $d\varepsilon_r$ 分别代表轴向应变微分、环向应变微分和厚向应变微分。此外,正反向压力比影响板材的应力应变状态:当 λ 由 0 到 1 增加时,环向应力由拉应力逐渐变为压应力;当 $\lambda > 1$ 时,环向应力再次变为拉应力,环向应变由压缩变形变为伸长变形,如图 9 所示,其中 σ_r 、 ε_r 、 ε_θ 和 ε_z 分别代表厚向应力、径向应变、环向应变和厚向应变。

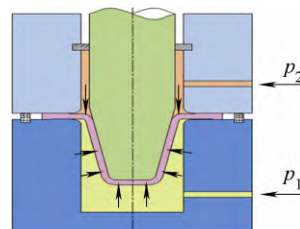
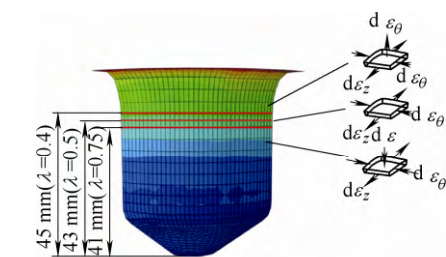
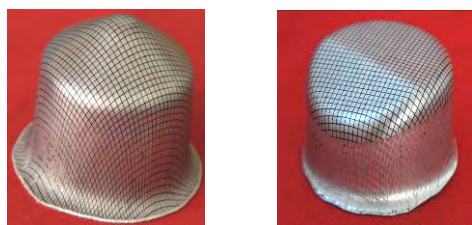


图7 正反向加压充液拉深工艺原理示意图



(a) 壁厚不变线位置



(b) 锥底筒形件

(c) 斜底筒形件

图 8 正反向充液拉深成形

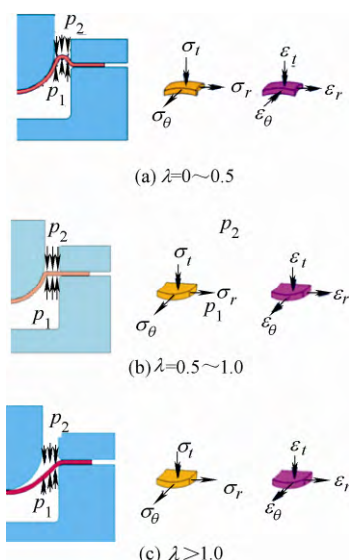


图 9 正反向压力比与应力应变的关系

1.4 双板成对液压成形

液体凸模拉深为保持成形液压需要施加较大的合模力，导致法兰区板材的流动困难。因此，针对复杂变截面薄壁空腔零件的成形需要，国内外学者提出板材成对液压成形技术^[21-24]。该方法采用两张周边焊接的板材(也可以不焊接)，在成形初期采用较小的合模力，通过预留的充液孔充入液体，使上下板材在液压的作用下分别贴模到上下模腔内，成形后期采用较高的合模力和液体压力，成形出小圆角等局部特征，原理如图 10 所示。该技术适合具有复杂异形截面特征和局部特征的汽车 B 柱、副车架、防撞杆、油箱等零件的成形。文献[25]通过液体压力与合模力的最佳匹配，成形出变轴线异形截面 B 柱型空腔零件，避免冲压成形后再焊接造成的翘曲，成形效率高，成形精度好，如图 11 所示。

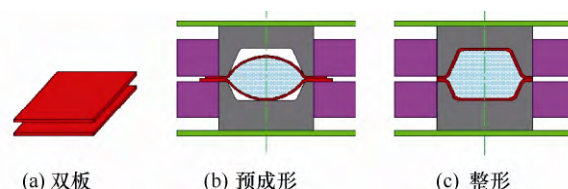


图 10 双板成对液压成形原理示意图



(a) 上表面件

(b) 下表面件

图 11 双板成对液压成形的 B 柱零件

1.5 热态液压成形

针对奥氏体不锈钢、高温合金板材应变硬化显著、成形难度高、回弹大、残余应力大，以及镁、铝合金等轻合金板材室温下塑性较低、成形性差等问题，国内外学者提出热态液压成形技术^[26-27]。如 304 不锈钢在液室压力 50 MPa 下，采用微温充液拉深(90 °C)可一次成形出拉深比 3.3 的深筒形件，成形压力比室温降低 38%，残余应力降低 52%^[28]，如图 12a 所示。AZ31 镁合金板材在温热状态下(225 °C)充液拉深，板材塑性明显改善，拉深速度为 1 mm/s 时，可以成形拉深比 3.0 的平底筒形件^[29]，如图 12b 所示。

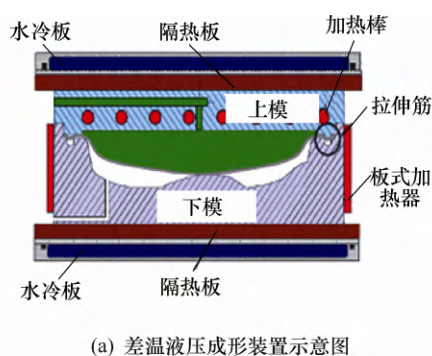


(a) 不锈钢筒形件

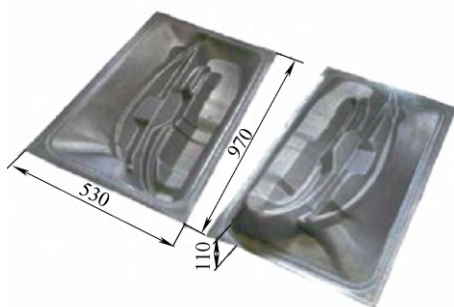
(b) 镁合金筒形件

图 12 热态充液拉深成形的筒形件

此外，日本、德国以及美国的研究人员提出差温充液拉深技术，并开展了镁合金、铝合金差温液压成形研究^[30-31]，如图 13 所示。但是，与热气胀成形相比，热态液压成形采用热油作为成形介质，存在成形效率低、工作环境恶劣、能耗大等问题，目前该方法还处于研究阶段。



(a) 差温液压成形装置示意图



(b) 热态液压成形件

图 13 热态液压成形工艺与成形件

表面达到 2 级表面质量, 优于普通拉深成形^[13]。2011 年, Amino 北美公司实现了发罩外板、发罩内板、门外板、侧围内外板等铝合金车身覆盖件的液压成形^[34], 如图 14c 所示。此外, 德国 AP&T 公司研制出多种复杂形状深腔零件, 如图 14d 所示。



(a) 发动机唇口



(b) 铝合金顶盖



(c) 铝合金发罩外板



(d) 复杂深腔零件

图 14 国外研制的典型板材液压成形件

2 板材液压成形技术应用现状

目前, 板材液压成形已经成为美国、欧盟和日本等先进制造国家和地区解决复杂薄壁件精确、高效、整体成形的关键技术, 并已经在高档轿车车身覆盖件、航空发动机、运载火箭整流罩等复杂零件、难成形材料的成形中获得初步应用。成形零件种类覆盖几百种, 包括筒形、球形、锥形、抛物线形等旋转体零件以及具有复杂曲面的非旋转体零件, 成形材料涵盖低碳钢、不锈钢、高强钢、高温合金、铝合金、镁合金、钛合金等, 厚度从 0.2 ~ 3.2 mm, 最大零件尺寸达到 2 200 mm×1 600 mm, 成形精度(贴模度)小于 0.25 mm, 最大壁厚减薄率小于 12%。

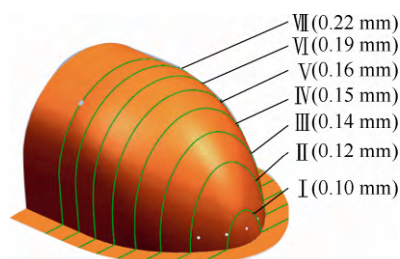
例如, 在航空航天领域, 美国国防部投入大量资金, 集中了波音、福特及俄亥俄州立大学等 12 个航空企业和高校科研机构开展板材液压成形研究, 为美国某型号战机研制出唇口零件, 如图 14a 所示。零件外径为 800 mm, 壁厚为 1.2 mm, 成形精度达到 0.3 mm, 采用 1 道次的液压成形代替了传统的 20 多道拉深工序^[32]。

在车身覆盖件制造领域, 德国 Schuler 公司采用厚度 1 mm 的 6016T4 铝合金板通过预胀-充液拉深成形出大吉普车顶外板零件, 增加了铝合金车顶外板的变形强化, 提高了零件的整体刚度^[33], 如图 14b 所示。德国蒂森克虏伯公司成形出 0.60 mm 的 DP500 双相钢车顶外板, 零件抗凹性增加 7%, 外

国内研究机构较早开展了板材液压成形技术的研究, 其中哈尔滨工业大学是最早系统开展液压成形技术研究的单位之一, 研制的铝合金深筒件、复杂曲面整流罩、头罩、五通等零件已经在航天领域获得应用, 零件成形精度(贴模度)小于 0.22 mm, 最大减薄率小于 12%, 如图 15 所示。此外, 随着高档轿车、新能源汽车的开发以及铝合金车身的逐步应用, 以一汽、二汽为代表的我国自主汽车制造企业已经将目光关注到板材液压成形领域, 并着手引入相关技术和设备, 采用板材液压成形更加复杂的车身覆盖件产品。



(a) 典型液压成形零件



(b) 双曲率曲面件尺寸精度

图 15 哈尔滨工业大学研制的板材液压成形件

3 板材液压成形装备发展现状

近年来,板材液压成形技术得到世界各国的极大关注并投入巨资,促生了相关技术和装备的突破。但截至目前,世界上只有 3~5 家机构系统掌握了板材液压成形的核心技术,具备大型装备的研发能力,代表板材液压成形装备的最新发展方向。

德国 Schuler 公司研制出合模力 100 MN 的四柱式液压成形机,如图 16 所示。该设备采用 6 缸压边,压边力达 30 000 kN,成形液体由多个增压器提供,液室容积 500 L,最大液压 30 MPa,设备台面尺寸达 6 000 mm×2 200 mm,质量为 1 230 t,并采用 NUMERIC-HM 系统实现液压成形控制。



图 16 德国 Schuler 公司研制的 100 MN 液压成形机

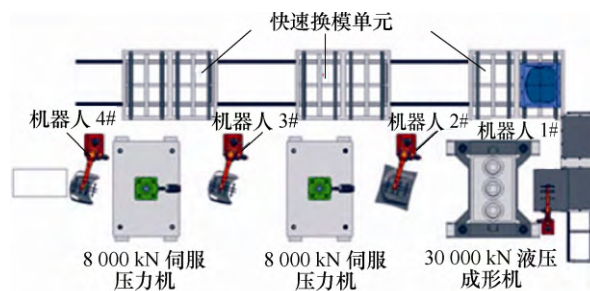
瑞典 AP&T 公司研发的 5 000 kN 板材液压成形机,能提供的最大液压为 100 MPa,可以成形各种复杂曲面零件。该装置的液压成形部分相对独立,可以安装在不同的 AP&T 液压机上,实现给液、增压、保压、卸压等过程,液压加载曲线可以通过数控编程实现控制。

日本 Amino 公司北美分公司已经建成一条板材液压成形车身覆盖件生产线,如图 17 所示。其中,板材液压成形机吨位为 30 000 kN,工作台面尺寸为 4 500 mm×2 500 mm,最大压边力为 6 000 kN,最大液压 30 MPa,最大拉深深度为 450 mm。该设备可以一步拉深出十分复杂的车身覆盖件,利用随后的 2 台 8 000 kN 普通液压机可以完成修边、冲孔和翻边、整形工序^[34-36]。

哈尔滨工业大学从 1990 年开始系统研究液压成形工艺和装备,掌握了板材液压成形核心工艺、关键技术、成形模具和装备制造能力。研制的 13 000 kN 第三代数控板材液压成形设备,高压液体容积为 90 L,最高液体压力为 100 MPa,工作台面尺寸为



(a) 日本 Amino 公司 30 000 kN 板材液压成形机



(b) 板材液压成形生产线示意图

图 17 Amino 北美公司板材液压成形机及生产线

2 800 mm×2 500 mm,具有预胀成形、径向加压成形、双向加压成形等复合功能,可实现成形全工艺过程的拉深位移、压边力、高压液体流量和压力的数控加载,压力控制精度和位移控制精度高,成形设备如图 18 所示。



图 18 哈尔滨工业大学研制的 13 000 kN 双动板材液压成形设备

哈尔滨工业大学联合有关单位,正在研制世界最大吨位的“150 MN 双动板材液压成形设备”,如图 19 所示。该设备采用多项专利技术,完全自主研发。采用 5 个高压源并联同步控制,液体容积为 5 m³,最大液体压力为 100 MPa;主机自重为 1 900 t,总高度为 19.5 m,工作台面尺寸为 4.5 m×4.5 m,采用 6 个液压轴的联动智能控制。拉深力 150 MN 和液体容积 5 m³这两个指标都是目前世界最大(目前

有最大压边力和最大液体容积的是德国研制的液压成形机,分别为 100 MN 和 500 L),能完成直径 4 m 的整体零件液压成形,该设备将用于航天、大型商用客机、高速列车、大型液化天然气、石油、船舶等国家重大工程。

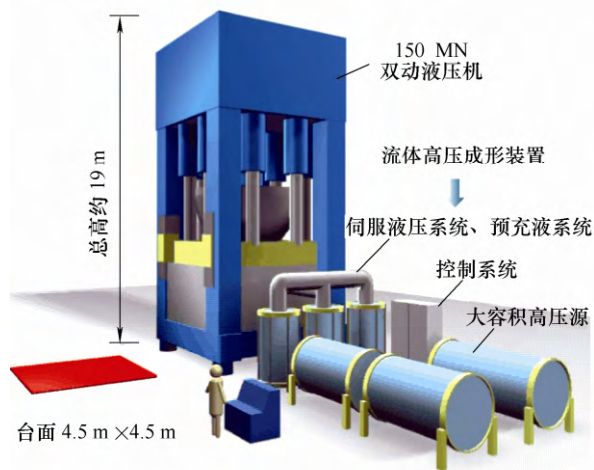


图 19 150 MN 双动板材液压成形设备(效果图)

4 结论

随着大飞机、大运载、高速列车、高档轿车等航空航天、汽车制造业对整体式、高精度、轻量化结构的需要,板材零件将进一步向大尺寸、薄壁、深腔、复杂曲面等方向发展;同时,在现代制造装备向大型化、集成化、智能化方向的发展趋势下,以及在铝合金、镁合金、高强钢、多层板、拼焊板、复合板等新材料的不断应用过程中,板材液压成形技术将面临新的挑战。例如,铝合金板材成形液压相对较低(通常小于 30 MPa),但铝合金塑性较低、对成形工艺控制的要求更为苛刻;而不锈钢、高温合金以及高强钢板,虽然塑性较高,但变形硬化和回弹行为更为突出,成形液压可达 100 MPa,给密封和模具结构等带来困难。展望未来,板材液压成形技术和装备将向以下几个重点方向发展。

(1) 复杂型面构件多向复合加载液压成形。随着零件成形难度的增加,单一工艺或单一加载方式很难有效地解决起皱、成形极限低、变形不均、回弹超差、小圆角成形等问题,需要采用径向、正向、反向等多向复合加载方式进一步满足成形的需要。此外,在现有技术基础上根据成形需要开发拉深-液压成形、液压-电磁成形、液压-电液成形、多点模-液压成形等复合成形工艺,优化加载路径,实现加载过程的复合与协同可控。

(2) 大尺寸薄壁整体构件液压成形。大尺寸(直

径大于 2 m)、薄壁(相对厚度小于 0.3%)零件迫切需要采用整体成形代替传统拼焊结构,现有板材液压成形装备将向大型化(设备吨位大于 100 MN)方向发展。为此,需要突破大型板材液压成形装备制造和成形工艺关键技术,包括:设备结构优化和刚度分配、高压液体成形反力控制、高压液体流量和压力匹配、大型复杂曲面件液压成形模具、大尺寸曲面件壁厚均匀性控制、回弹控制等关键技术。

(3) 难变形材料超高压成形。针对轻合金、复合材料等低塑性材料的成形问题,进一步发展热态下板材液压成形工艺,开发新型耐高温、安全、环保热态流体介质,解决加热、隔热、冷却关键技术,深入发展差温热态液压成形技术。此外,采用室温超高压实现高强钢、高温合金等难变形材料的成形,需要突破超高压的建立、液体密封、耐高压模具的设计和制造等关键技术。

随着制造行业的发展,板材液压成形技术将会发展得更快、更好,成为未来的一项更具潜力的先进制造技术。

参 考 文 献

- [1] LEE M G, KIM C, PAVLINA E J, et al. Advances in sheet forming : Materials modeling , numerical simulation , and press technologies[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering , 2011 , 133 : 061001-1-061001-12.
- [2] NGAILE G, KINSEY B. Advances in plastic forming of metals[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering , 2011 , 133 : 060301-1-060301-3.
- [3] INGARAO G, LORENZO R D, MICARI F. Sustainability issues in sheet metal forming processes : An overview[J]. Journal of Cleaner Production , 2011 , 19 : 337-347.
- [4] TOLAZZI M. Hydroforming applications in automotive : A review[J]. International Journal of Materials Forming , 2010 , 3(Suppl.1) : 307-310.
- [5] 刘欣,王国庆,李曙光,等. 重型运载火箭关键制造技术发展展望[J]. 航天制造技术, 2013(2) : 1-6.
LIU Xin, WANG Guoqing, LI Shuguang, et al. Forecasts on crucial manufacturing technology development of heavy lift launch vehicle[J]. Aeronautical Manufacturing Technology , 2013(2) : 1-6.
- [6] YANG D Y. Innovation and creativity in metal forming[C]//The 10th International Conference on Technology of Plasticity, Aachen, Germany, Sept. , 2011. 2011 : 25-30.
- [7] JESWIET J, GEIGER M, KLEINER M, et al. Metal

- forming progress since 2000[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology , 2008 , 1 : 2-17.
- [8] 苑世剑. 现代液压成形技术[M]. 北京：国防工业出版社，2009.
- YUAN Shijian. Modern hydroforming technology[M]. Beijing : National Defense Industry Press , 2009.
- [9] YANG D Y , KIM J B , LEE D W. Investigation into manufacturing of very long cups by hydromechanical deep drawing and ironing with controlled radial pressure[J]. Annals of the CIRP , 1995 , 44 : 255-258.
- [10] XU Y C , HAN C , LIU X , et al. Effects of radial pressure on 5A06 aluminum alloy cup hydroforming[J]. Steel Research International , 2010 , 81(9) : 632-635.
- [11] LIU X J , XU Y C , YUAN S J. Effects of loading paths on hydrodynamic deep drawing with independent radial hydraulic pressure of aluminum alloy based on numerical simulation[J]. Journal of Material Science and Technology , 2008 , 24(3) : 395-399.
- [12] CHEN B G , XU Y C , YUAN S J. Investigation into influence of pre-bulging on subsequent hydrodynamic deep drawing[J]. Reviews on Advanced Materials Science , 2013 , 33(5) : 423-428.
- [13] SCHWARZ S , RUPP M , ROTHE H. Production of a high-strength steel roof outer panel by AHU hydromechanical sheet forming[C]//International Conference “Hydroforming of Sheets , Tubes and Profiles” , Germany , Metal Forming Technology (IFU) of the University of Stuttgart , 2005 : 37-58.
- [14] 陈保国,徐永超. 预胀对双相钢筒形件充液拉深变形和硬化的影响[J]. 材料科学与工艺, 2011 , 19(1) : 17-20.
- CHEN Baoguo , XU Yongchao. Influence of pre-bulging on deformation and hardness of dual-phase steel cylindrical cup by hydrodynamic deep drawing process[J]. Materials Science and Technology , 2011 , 19(1) : 17-20.
- [15] XU Y C , LIU W , YUAN S J , et al. Effects of counter pre-bulging on sheet hydro-forming[C]//The 7th International Conference “Hydroforming of Sheet , Tubes and Profiles” , Stuttgart , Germany , May 22-23 , 2012. 2012 : 139-151.
- [16] XU Y C , LI F , LIU X , et al. Effects of pre-bulging on 2024 aluminum alloy complex-shaped components[J]. JOM , 2011 , 63(5) : 39-41.
- [17] LIU X , XU Y C , YUAN S J. Hydro-forming of aluminum alloy complex-shaped components[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China , 2011 , 21 : 417-422.
- [18] KHANDEPARKAR T , ANDREAS G. Equipment and die design optimization for hydromechanical deep drawing[C]// International Conference “Hydroforming of Sheets , Tubes and Profiles” , Germany , Metal Forming Technology (IFU) of the University of Stuttgart , 2005 : 107-133.
- [19] 崔晓磊,王小松,苑世剑. 法向应力对板料成形极限影响的研究进展[J]. 塑性工程学报, 2013(2) : 1-9.
- CUI Xiaolei , WANG Xiaosong , YUAN Shijian. Progress on effects of through-thickness normal stress on sheet metal forming limit[J]. Journal of Plasticity Engineering , 2013(2) : 1-9.
- [20] 林俊峰,刘伟,徐照. 铝合金筒形件正反加压液力成形技术研究[J]. 材料科学与工艺, 2010 , 18(12) : 75-78.
- LIN Junfeng , LIU Wei , XU Zhao. Forming technology of hydroforming aluminum alloy cylinder components with positive and negative pressure[J]. Materials Science and Technology , 2010 , 18(12) : 75-78.
- [21] BOLAY C , LIEWALD M. Enhanced process for double sheet hydroforming[C]//International Conference “Hydroforming of Sheets , Tubes and Profiles” , Germany , Metal Forming Technology (IFU) of the University of Stuttgart , 2010 : 137-158.
- [22] GEIGER M , COJUTTI M. Integration of double sheet and tube hydroforming processes : Numerical investigation of the feasibility of a complex part[J]. International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering , 2009 , 2(1-2) : 110-117.
- [23] AHMAD A , MOHAMMAD R E. Pressure estimation in the hydroforming process of sheet metal pairs with the method of upper bound analysis[J]. Journal of Materials Processing Technology , 2009 , 209(5) : 2270-2276.
- [24] OH S I , JEON B H , KIM H Y , et al. Applications of hydroforming processes to automobile parts[J]. Journal of Materials Processing Technology , 2006 , 174(1-3) : 42-55.
- [25] LIU W , CHEN Y Z , CUI X L , et al. Welded double sheet hydroforming of complex hollow component[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China , 2012 , 22 : s309-s314.
- [26] MUAMMER K S , ALI A , JOHN C. An Experimental study on robustness and process capability of the warm hydroforming process[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering , 2011 , 133(4) : 021008-1-13.
- [27] MUAMMER K S , MAHAHUNPHACHAI E B. Forming characteristics of austenitic stainless steel sheet alloys under warm hydroforming conditions[J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol. , 2011 , 56 : 97-113.
- [28] XU Y C , KANG D C. Investigation of sus304 stainless steel with warm hydro-mechanical deep drawing[J]. Journal of Material Science & Technology , 2004 , 20(1) : 92-93.
- [29] LIU W , WU L Z , YUAN S J. Effect of hydraulic pressure

- on warm hydro mechanical deep drawing of magnesium alloy sheet[J]. International Journal of Modern Physics B , 2009 , 23 : 1975-1981.
- [30] MULT E H , GEIGER M. Sheet and tube hydroforming at elevated temperatures[C]//International Conference on Hydroforming. Fellbach , Germany , 2003 , 3 : 259-278.
- [31] GROCHE P , HUBER R , DORR J , et al. Hydroforming of aluminum alloys at elevated temperatures[J]. Annals of CIRP , 2002 , 51(1) : 215-218.
- [32] JOHANNISSON T G. Low volume production of sheet metal parts[C]//International Conference “Hydroforming of Tubes , Extrusions and Sheet Metals” , Stuttgart , Germany , 2001 : 158-179.
- [33] HOFFMANN H , SEMMLER S , GOLLE M , et al. Technological characteristics of hydro-formed parts[C]//International Conference “Hydroforming of Tubes , Extrusions and Sheet Metals” , Germany : Metal Forming Technology (IFU) of the University of Stuttgart , 2001 : 235-246.
- [34] MAKI T. Sheet hydroforming of aluminum body panels[C]//International Conference on “Hydroforming of Sheets , Tubes and Profiles” , Stuttgart , Germany , May 22 , 2012. 2012 : 41-55.
- [35] MAKI T , ENG P. Current status of fluid forming in the automotive industry[C]//International Conference “Hydroforming of Tubes , Extrusions and Sheet Metals” , Germany : Metal Forming Technology (IFU) of the University of Stuttgart , 2003 : 25-44.
- [36] MAKI T , ENG P. Sheet Hydroforming of automotive body panels[C]//International Conference “Hydroforming of Tubes , Extrusions and Sheet Metals” , Germany : Metal Forming Technology (IFU) of the University of Stuttgart , 2005 : 187-202.
-
- 作者简介：苑世剑，男，1963 年出生，博士，教授，博士研究生导师，长江学者特聘教授，国家杰出青年基金获得者。主要研究方向为管材内高压成形和板材液压成形技术与装备。
E-mail : syuan@hit.edu.cn
- 刘伟(通信作者)，男，1977 年出生，博士，副教授，硕士研究生导师。主要研究方向为板材液压成形。
E-mail : liuw@hit.edu.cn