

## 应用技术

## 铝合金复杂曲面薄壁件液压成形技术

刘欣, 徐永超, 苑世剑

(哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

**摘要:**介绍了适合于制造铝合金复杂曲面薄壁件的液压成形技术,包括充液拉深、可控径向加压充液拉深和液体凸模拉深。由于充液拉深能提高成形极限,适合于制造铝合金复杂型面零件。可控径向加压充液拉深通过径向压力向内推料,进一步提高了成形极限,适合于成形大高径比筒形件。液体凸模拉深适合于获得深度较大、形状复杂、尤其底部具有小过渡圆角的复杂形状零件。

**关键词:**铝合金;薄壁件;充液拉深;液压成形

**中图分类号:** TG306; TG386.41      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-6457(2010)01-0042-04

## Hydro-forming for Aluminum Alloy Complex-shaped Components

LIU Xin, XU Yong-chao, YUAN Shi-jian

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Hydro-forming for aluminum alloy complex-shaped sheet component is introduced, including hydro-mechanical deep drawing, hydro-forming with radial controllable pressure and drawing of fluid punch. Due to an enhanced forming limit, hydro-mechanical deep drawing is suitable for manufacturing complex-shaped components. Pushing the rim of blank by fluid pressure, hydro-forming with radial controllable pressure can improve forming limit further, and suitable for producing large height-diameter ratio cups. Drawing of fluid punch is suitable for making deeper, complex-shaped components with small radius at the bottom.

**Key words:** aluminum alloy; sheet component; hydro-mechanical deep drawing; hydro-forming

随着结构向多功能和复杂化的发展,火箭、飞机等使用的薄壁钣金件形状越来越复杂,包括空间曲面、高次函数曲面和非回转体。目前,航天、航空行业复杂曲面钣金件制造技术主要为落锤砸压成形(简称“落压”)和普通拉深。“落压”的主要问题是废品率高,尺寸精度一致性差,材料内部组织损伤影响疲劳性能,铅锌材料模具污染环境等,已经成为被限制使用的技术。普通拉深主要问题是由于铝合金塑性差,需要多道次拉深和中间退火,废品率高,产

品质量差。

铝合金一直是运载火箭和飞机机体主体结构材料。随着高性能铝合金广泛应用,塑性成形难度越来越大。例如,铝合金的强度由 150 MPa 提高到 530 MPa 时,延伸率由 30% 降低到 10%。因此,面向高性能铝合金复杂形状零件塑性成形技术得到迅速发展。文中重点介绍了适合航天、航空工业制造复杂曲面钣金件的充液拉深<sup>[1-3]</sup>、周向加压充液拉深<sup>[4-5]</sup>和液体凸模拉深<sup>[6-7]</sup>等成形技术的原理、特

收稿日期: 2009-11-26

作者简介: 刘欣(1972-),男,辽宁鞍山人,硕士,高级工程师,主要研究方向为板材液压成形技术。

点、典型零件和适用范围。

## 1 充液拉深原理和特点

充液拉深是利用液体作为传力介质代替凹模,使板材成形到刚性凸模上的一种板料成形方法,如

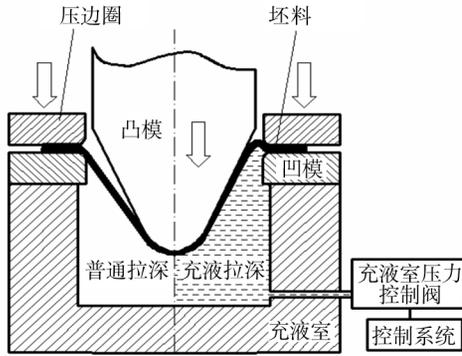


图1 充液拉深原理

Fig. 1 Principle of hydro-mechanical deep drawing

图1所示。充液拉深的主要优点是能提高成形极限,减少成形道次,尺寸精度高和表面质量好。对于圆筒形件普通拉深1个道次最大拉深比为2,而充液拉深1个道次拉深比达到2.6,有时接近3,如图2所示。对于锥形零件,采用普通拉深工艺(如图1

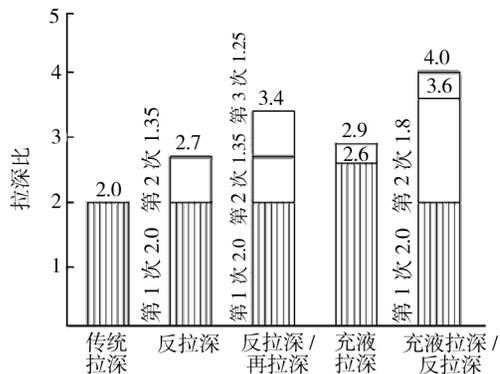


图2 各种工艺拉深比的比较

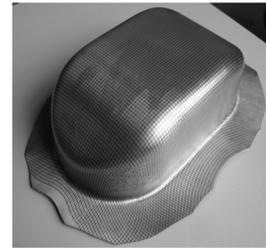
Fig. 2 Comparison of different drawing processes

左侧所示)需要6道次和6套模具,而且各道次之间还需要退火;而采用充液拉深工艺(如图1右侧所示)仅需要1道次,大大简化了工艺和节约模具费用。

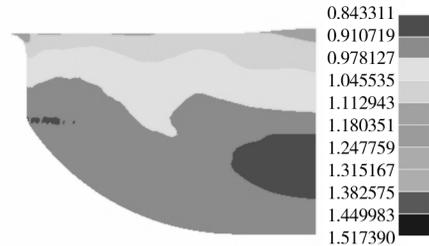
充液室压力是影响充液拉深成形质量和缺陷的主要工艺参数,存在一个合理的范围。拉深比越大,充液室压力变化范围越小,充液室压力存在上限值和下限值,低于下限值或超过上限值均易发生破裂。

这主要是由于拉深比越大,为避免凸模圆角破裂所需的充液室压力越高,较高的充液室压力增大了压边圈与法兰之间的不利摩擦,且容易产生反胀减薄,引发凹模圆角附近的破裂,为克服凸模圆角破裂增大压力和克服凹模圆角破裂减小压力使得合理的充液室压力范围减小。

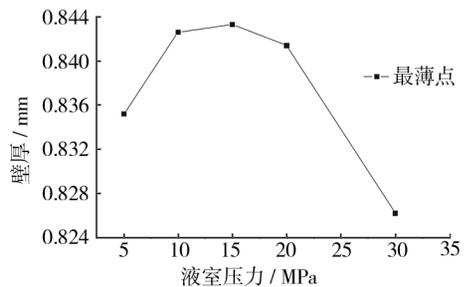
充液室压力对壁厚分布也有重要影响。用充液拉深获得的一种复杂型面铝合金深盒型件如图3所



a 零件



b 壁厚分布(单位: mm)



c 最小壁厚随充液室压力变化

图3 铝合金深盒型件充液拉深

Fig. 3 Hydro-mechanical deep drawing of deep aluminum alloy workpiece

示,材料为2A12铝合金,壁厚1mm。从图3看出,充液室压力在10~15 MPa之间减薄率最小,超过15 MPa后减薄率增加。2A12铝合金充液拉深件与落锤成形件的比较如图4所示。由图4看出,由于多道次成形和中间退火,落锤成形件的微观组织比较粗大;而充液拉深是一次成形,微观组织细化,平均晶粒度小于10 $\mu$ m。

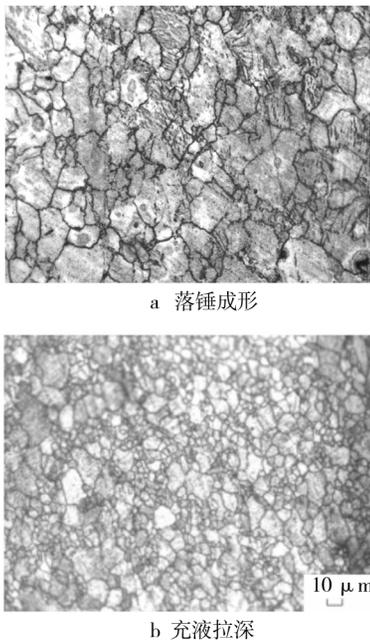


图4 微观组织比较

Fig. 4 Comparison of microstructure

### 2 可控径向加压充液拉深成形

可控径向加压充液拉深成形原理如图5所示。该技术是在充液拉深的基础上,辅以独立于充液室压力的可控径向液压力 $p_r$ ,来推动法兰区材料的向内流动。由于普通的充液拉深成形还主要依靠充液室压力作用来增大板材与凸模之间的有益摩擦

和建立坯料与凹模之间的流体润滑,从而缓解凸模圆角处坯料径向拉应力,来提高板材零件的成形极

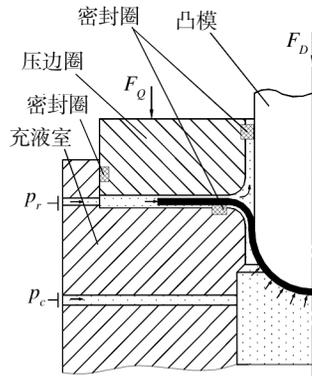


图5 可控径向加压充液拉深原理

Fig. 5 Principle of hydro-forming with radial controllable pressure

限。对于低塑性铝合金材料的锥面、球面、抛物线截面等件和锥盒形零件,过大的充液室压力会导致曲面零件成形初期悬空区的破裂和锥盒形零件棱边角部起皱。单纯通过增大充液室压力增大有益摩擦来提高成形极限是有限的,大高径比零件的成形仍然困难。可控径向加压充液拉深过程中,由于径向液压与充液室液压相互独立控制,可根据材料性能、零件形状和成形极限通过增大径向压力来辅助零件的拉深成形,避免大高径比曲面零件成形初期因充液室压力过大导致悬空区的破裂,从而进一步提高零件的成形极限。采用该技术成形的5A06铝合金深球底筒形件(拉深比达到2.8)、壁厚分布及径向压力对拉深比的影响规律如图6所示。

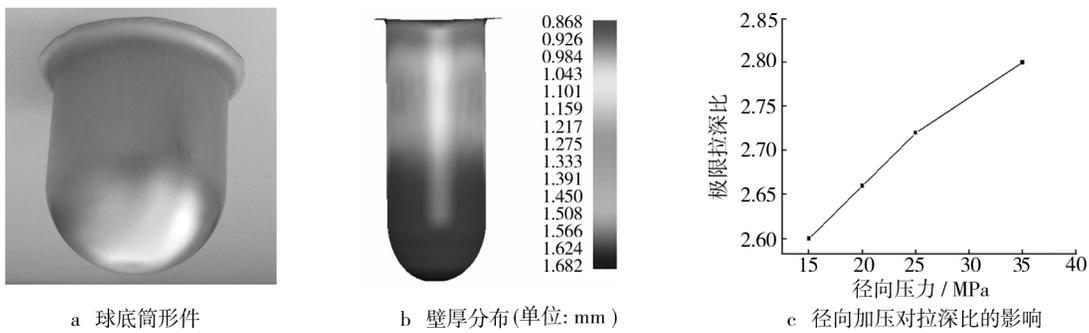


图6 铝合金球底筒形件可控径向加压充液拉深

Fig. 6 Hydro-forming with radial controllable pressure of aluminum alloy cup

### 3 液体凸模拉深成形

随着压边力伺服控制技术和高压密封技术的进

步,近年来以液体做为凸模的液压拉深技术得到了迅速发展。在德国,这种技术也称为板料高压成形(High-Pressure Forming of Sheet Metal),如图7所示。主要工艺特点是压边力( $F_e$ )随内压实时变

化,在成形初期(如图7a所示),内压较低时,压边

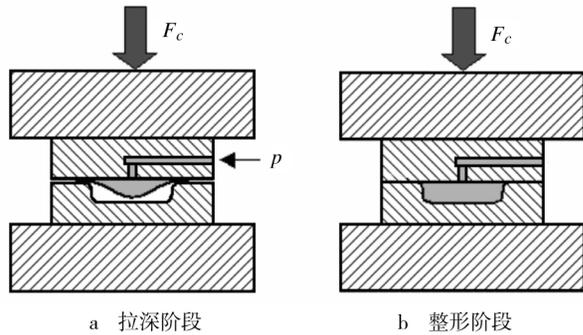
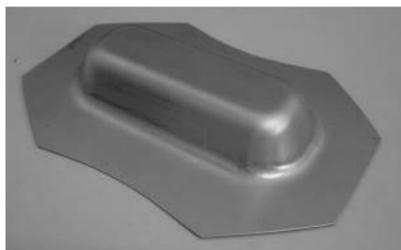


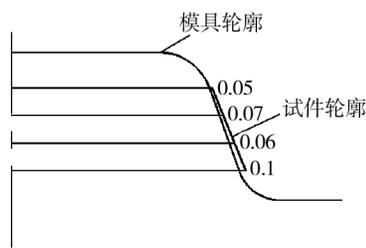
图7 液体凸模拉深成形原理

Fig. 7 Principle of drawing of fluid punch

力较小,以利于板料拉入模具内;在成形后期(如图7b所示),当板料全部拉到模具内时,提高压边力保证密封,这时增加内压对零件进行整形,整形最高压力可达150 MPa,因此可以获得深度较大,形状复杂,尤其局部具有小过渡圆角的零件。过去类似的胀形工艺,由于压边力实时控制困难,为了保证密封,初期施加的压边力较大,使得板料拉入模具内较困难,实际上成为了纯胀形,因此深度小、壁厚减薄



a 零件



b 尺寸精度(单位:mm)

图8 铝合金复杂曲面件液体凸模拉深

Fig. 8 Drawing of fluid punch of aluminum alloy complex-shaped component

不均匀和形状简单。采用液体凸模拉深技术成形的铝合金复杂零件如图8所示,该件材料为硬铝合金2A12,塑性差,由于法兰边大和底部圆角小,普通刚性拉深和充液拉深均不能成形。采用液体凸模拉深技术一个道次可以成形,由于高压整形的作用,零件尺寸精度很高,样板间隙达到0.1 mm。

## 4 结语

液压成形技术近十多年来在工业生产中得到广泛应用,逐步成为薄壁零件制造的先进技术之一。火箭、飞机等飞行器对减轻结构质量和降低成本的

需求促进了液压成形技术的不断发展,主要发展趋势如下所述。

1) 成形新工艺。向着正反加压充液拉深、预胀充液拉深、热态充液拉深技术方向发展。主动径向加压充液拉深,除充液室内液体压力作用外,在板料法兰区径向独立施加液压,拉深过程中辅助推动板料向凹模口内流动,可以进一步提高零件成形极限,实现更深、更复杂零件的成形。正反加压充液拉深,在成形坯料的上表面施加液压来配合充液拉深,可以部分甚至全部抵消液室压力导致的反胀,尤其适合成形过程中具有较大悬空区的锥形件等的成形,允许施加更大的液室压力,抑制减薄,提高成形极限。预胀充液拉深,先预胀、再拉深以达到应变硬化来提高大型零件整体刚度的目的,提高零件刚度,省去加强筋板,适合成形大型零件。

2) 大型复杂型面零件成形。大型复杂型面零件普通冲压成形往往需要与零件形状尺寸一致的凸模及与型腔相配的凹模,模具成本高,试模周期长。充液拉深成形只需凸模,凹模型腔可以简化,液室压力起到软凹模的作用使板材贴模,显著降低模具成本,模具调试简单。

3) 与普通拉深工艺复合。普通拉深成形出零件大部分,再用液压成形加工出局部需要的特殊形状。或者先充液拉深成形出零件,再用普通成形工艺。

## 参考文献:

- [1] JOACHIM Danket, KARL Brain Nielsen. Hydromechanical Deep Drawing with Uniform Pressure on the Flange [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 49(1): 217-220.
- [2] XU Yong-chao, KANG Da-chang. Investigation of SUS304 Stainless Steel with Warm Hydro-mechanical Deep Drawing [J]. Journal of Material Science & Technology, 2004, 20(1): 92-93.

(下转第56页)

## 4 结语

振动时效工艺对减少和均匀化薄壁铸件的残余应力效果良好,这是由于在振动时效过程中,零件承受周期性的附加应力作用,在应力集中处当激振附加应力和零件内部残余应力叠加后,率先达到或超过材料的屈服极限,发生局部微塑性变形,继而在整体上发生较大的塑性变形。峰值应力处产生的塑性变形大,而其他部位相对较小,经过多次交变应力作用,由于微/宏观塑性变形导致了零件中残余应力的降低和均匀化。

1) 在振动时效后,薄壁铸件残余应力降低35%以上,并且峰值应力降低,应力分布得到了均化;

2) 与热时效相比,节约工艺成本70%以上,并且大大地缩短了处理时间。

### 参考文献:

- [1] 张勇. 二十一世纪高效节能环保高新技术——振动消除应力技术[J]. 中国机械工程, 2002, 13(19): 1640-1642.
- [2] 房德馨. 金属的残余应力与振动处理技术[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1989: 20-100.
- [3] 许旻, 李庆本. 振动时效的振动力学分析[J]. 焊接学报, 2000, 21(1): 79-82.
- [4] 宋天民, 张国福, 尹成江. 振动时效机理的研究[J]. 吉林大学自然科学学报, 1995(1): 53-56.
- [5] 贺艺, 许艺萍. 振动时效机理及其在消除应力方面的应用[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2009, 19(1): 39-41.
- [6] 张建军, 段辉. 振动时效机理及效果的评定[J]. 中国铸造装备与技术, 2005(4): 44-46.
- [7] MUNSI A S M Y, WADDELL A J, WALKER C A. The Effect of Vibratory Stress on the Welding Microstructure and Residual Stress Distribution[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2001, 215(12): 99-111.
- [8] 朱世根, 刘峰, 顾伟生, 等. 振动时效的应用[J]. 焊接技术, 2002, 31(6): 25-27.
- [9] WALKER C A, WADDELL A J, JOHNSTON D J. Vibratory Stress Relief - an Investigation of the Underlying Processes[J]. Journal of Process Mechanical Engineering, 1995, 209(1): 51-58.
- [10] 胡庆丰, 顾伟生, 吴贺龙, 等. 金属工件的振动时效技术[J]. 上海工程技术大学学报, 2007, 28(4): 294-296.
- [11] 耿鑫明. 振动时效及其应用[J]. 能源研究与应用, 2002(1): 45-46.
- [12] 徐秀娟, 高葛. 基于疲劳极限的振动时效激振力的选择[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(4): 294-296.
- [13] 沈华龙, 吴运新, 熊卫民. 振动时效应用于铝合金时动应力的选择[J]. 材料工程, 2009(4): 18-22.
- [14] 张定铨, 何家文. 材料中残余应力的X射线衍射分析和作用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000: 30-44.
- [3] NAKAMURA K, NAKAGAWA T, AMINO H. Various Application of Hydraulic Counter Pressure Deep Drawing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 71: 160-167.
- [4] 刘晓晶. 5A06铝合金板材可控径向加压充液拉深过程研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [5] LIU Xiao-jing, XU Yong-chao, YUAN Shi-jian. 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.
- [6] GROCHE P, HUBER R, SCHMOECHTEL D, et al. Hydromechanical Deep Drawing of Aluminium-Alloys at Elevated Temperatures[J]. Annuals of the CIRP. 2002, 51(11): 215-218.
- [7] GROCHE P, METZ C. Investigation of Active-elastic Blank Holder Systems for High-Pressure Forming of Metal Sheets[C]. Proc of 1st ICNFT, Harbin, China, 2004: 447-452.

(上接第45页)