

## 铝镁合金双路径加载充液拉深成形的数值模拟

刘晓晶<sup>1,2</sup>, 闫巍<sup>1</sup>, 郭立伟<sup>1</sup>

- (1. 哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150040;
2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对铝镁合金等低塑性板材的成形需要, 提出了带主动径向加压的双路径加载充液拉深技术。应用数值模拟的方法, 采用大型非线性动力显式分析软件 ETA/Dynaform5.5, 对 5A06 铝镁合金平底筒形件的双路径加载充液拉深成形过程进行研究, 讨论液室压力变化对零件成形性的影响, 以零件成形最终壁厚分布为评定标准, 分析不同径向压力加载路径对成形质量的影响。模拟结果表明, 采用合理的液室加载曲线, 并配合 20~45 MPa 的主动径向压力, 可有效地提高铝镁合金平底筒形件的成形极限, 拉深比可达到 3.1。

**关键词:** 5A06 铝镁合金; 充液拉深; 数值模拟; 双路径; 主动径向压力

中图分类号: TG 146.2

文献标识码: A

## Numerical simulation of aluminum-magnesium alloy cup's forming by hydrodynamic deep drawing with double loading paths

LIU Xiao-jing<sup>1,2</sup>, YAN Wei<sup>1</sup>, GUO Li-wei<sup>1</sup>

- (1. School of Materials Science and Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 15001, China)

**Abstract:** Aimed at the forming need of aluminum-magnesium alloy and other low plasticity materials, a new double loading paths process of hydrodynamic deep drawing (HDD) with independent radial hydraulic pressure and chamber pressure was brought forward. The numerical simulations of the aluminum-magnesium alloy (5A06) flat bottom cylindrical cup's HDD with double loading paths process were carried out by employing the large non-linear dynamic explicit analytical software ETA/Dynaform5.5. The chamber pressure variations to the formability effects were discussed. The influence of different independent radial hydraulic pressure loading paths on the forming quality was analyzed by taking the wall-thickness distribution as standard. The results show that adopting the reasonable liquid chamber pressure loading curves and the independent radial hydraulic pressure from 20 MPa to 45 MPa can increase the forming limitation of aluminum-magnesium alloy cup effectively. The drawing limitation obtained is 3.1.

**Key words:** aluminum-magnesium alloy (5A06); hydrodynamic deep drawing (HDD); numerical simulation; double loading paths; independent radial hydraulic pressure

板材充液拉深(Hydropneumatic Deep Drawing, HDD)是以一定压力液体作为传力介质代替刚性凹模传递载荷, 使板料在液体压力作用下贴靠凸模以实现金属板材零件的成形<sup>[1-2]</sup>。充液拉深与传统拉深相比, 具有能够有效抑制破裂、克服拉延不足、获得较高尺

寸精度和表面质量、提高成形极限及可成形复杂形状薄壁件等优点<sup>[3-8]</sup>。

随着汽车、航空、航天等领域零部件的轻量化需要, 铝镁合金、钛合金等轻质合金板料得到了广泛应用<sup>[9-13]</sup>。但是, 由于铝镁合金等轻质材料的应变硬化

指数  $n$  值和厚向异性指数  $r$  值较小, 拉深性能较差<sup>[14-15]</sup>。充液拉深的摩擦保持效应和溢流润滑效果可以控制变形区的减薄, 提高板材的成形性。因此, 采用充液拉深技术是提高铝镁合金等低塑性、难成形轻质材料板材零件成形极限, 减少成形道次的重要手段之一。

液室压力在提高板材零件的成形极限上的主要作用是, 一方面增加板料与凸模之间的有益摩擦, 阻止了已成形区域板料的继续变薄, 另一方面在法兰区建立起板料与凹模之间的流体润滑, 减小了因压边力引起的摩擦力, 从而使径向拉应力增加幅度得到缓解<sup>[16]</sup>。但过大的液室压力会使零件在拉深初期产生破裂。因此, 单纯依靠增大液室压力来提高成形极限是有限的, 大高径比、低塑性材料零件的成形仍然困难。基于铝镁合金大高径比的平底筒形件成形需要, 提出了带主动径向加压双路径加载充液拉深技术。采用双路径加载充液拉深技术, 其液室压力、径向压力、预成形初始压力等工艺参数的选取及匹配关系, 较普通的充液拉深工艺更为复杂。因此, 选择合理的液室加载曲线和径向压力加载路径是应用该技术实现零件成形的关键。本文作者采用基于 LS-DYNA3D 为内核的大型显式动态分析软件 ETA/Dynaform5.5, 通过数值模拟的方法对铝镁合金平底筒形件的双路径加压充液拉深进行研究, 探讨液室压力、径向压力的耦合对零件的成形和壁厚分布的影响, 得到合理的液室压力加载曲线和径向压力加载路径间的匹配关系。

## 1 双路径加载充液拉深技术原理

双路径加载充液拉深是在原有的普通充液拉深基础上, 辅以独立的液压加载系统将高压液体引至板料的法兰外缘, 推动法兰区板料向成形区域流动, 同时减小了零件变形区的径向拉应力, 并在板料与压边圈、板料与凹模之间形成双面流体润滑, 减小了摩擦阻力, 从而进一步提高板材的承载能力, 增加大高径比、难成形材料零件的可成形性, 其成形原理如图 1 所示。

## 2 双路径加载充液拉深数值模拟

### 2.1 模拟模型的建立

采用仿真模拟软件 ETA/Dynaform5.5 对 5A06 铝镁合金平底筒形件的主动径向加压充液拉深过程进行有限元模拟。图 2 所示为 5A06 铝镁合金平底筒形件

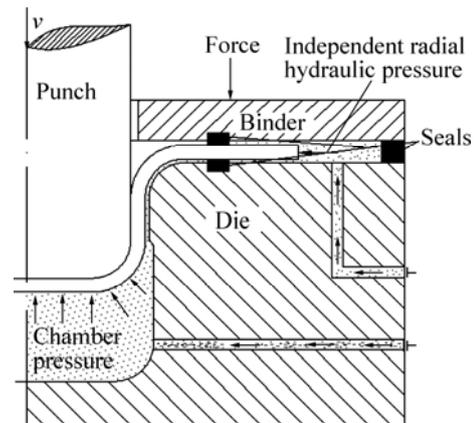


图 1 双路径加载充液拉深成形示意图

Fig.1 Schematic illustration of HDD process with double loading paths

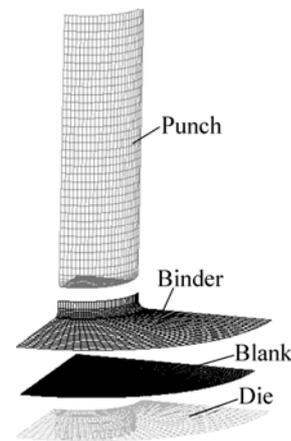


图 2 平底筒形件主动径向加压充液拉深模型

Fig.2 HDD with independent radial hydraulic pressure model of flat bottom cylindrical cups

主动径向加压充液拉深模型, 由于筒形件的对称性, 所以只选取板料和工具的 1/4 进行模拟即可, 但此时要限制好板料边界节点的自由度, 才能保证模拟结果的正确性。

板料选取 5A06 铝镁合金, 板料直径为 460 mm, 厚度为 1 mm, 其他板料参数如表 1 所列。凸模直径为 150 mm, 凹模的直径为 152.2 mm, 凹模的圆角半径为 10 mm, 预期得到拉深比为 3.1。材料模型为 37#厚向异性材料模型, 即 Hill 屈服模型。板料单元采用成形数值模拟中应用非常广泛的 Belytschko-Tsay (BT)壳单元, 接触类型为单向面一面接触, 凸凹模及压边圈视为刚性体。摩擦条件为库仑摩擦, 板料和凸模之间的摩擦因数为 0.14, 板料和凹模之间的为 0.04, 板料和压边圈之间的为 0.04。压边采用定间隙的方法,

凹模和压边圈的间隙为 1.2 mm。凸模模拟冲压速度为 1 000 mm/s。

表 1 板料力学性能参数

Table 1 Parameters of mechanical properties

Yield strength $\sigma_s$ /MPa	Extensibility /%	Hardening coefficient $n$	Anisotropy factor $r$	Poissons ratio
160	18	0.26	0.85	0.28

## 2.2 液室压力加载曲线的设计

采用的有限元模拟软件为动力显式算法的 LS-DYNA3D, 前后处理程序为 ETA/Dynaform5.5。目前, 板材成形的通用有限元软件还不能根据变形情况通过前处理模块实现液室液压自动加载到单元。LS-DYNA 具有开放性的特点, 可通过关键字文件的二次开发来实现充液拉深的数值模拟。本研究中液室压力的加载就利用了 LS-DYNA 中提供的关键字 LOAD\_MASK 来实现, 通过定义区域来限定施加的对象, 进入区域的单元将被施加液压。这使得充液拉深过程的模拟更准确。根据平底筒形件成形特点, 经过反复模拟得到了液室压力加载曲线, 如图 3 所示。

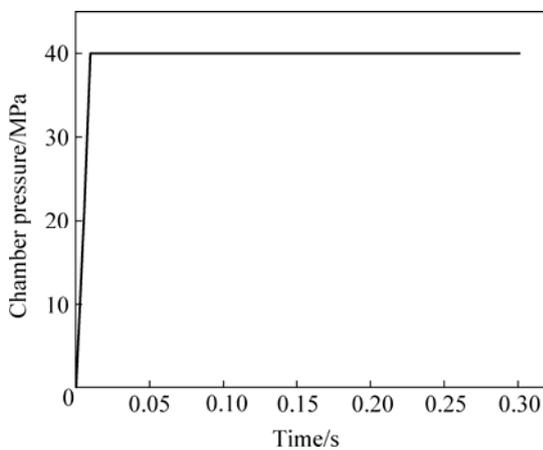


图 3 液室压力加载曲线

Fig.3 Curve of chamber pressure

## 2.3 主动径向压力的加载方法及加载路径的选取

在 ETA/ Dynaform5.5 软件中, 有限元模型中的板料是没有厚度的壳单元, 因此也就无法把径向施加的液压直接作用到法兰区的外缘上。采用的解决办法是将施加的主动径向液压等效成板料法兰外边缘节点的节点力, 并使节点力的方向均指向板料的圆心, 且在模拟中只能采用固定的有限元网格, 而不能选用自适应网格划分, 否则会使节点数发生改变, 从而使施加

的节点力无效, 导致模拟失败。其中, 节点力和径向油压之间的关系可表达为

$$f = \frac{\pi \cdot D \cdot t}{N} \cdot P$$

式中  $f$  为等效的节点力,  $P$  为径向油压,  $D$  为瞬时板料外缘直径,  $t$  为板料厚度,  $N$  为板料外缘的节点数。

主动径向压力加载如图 4 所示。选择 8 条径向压力加载路径进行模拟, 分别为 5、10、15、20、30、40、45 和 50 MPa。

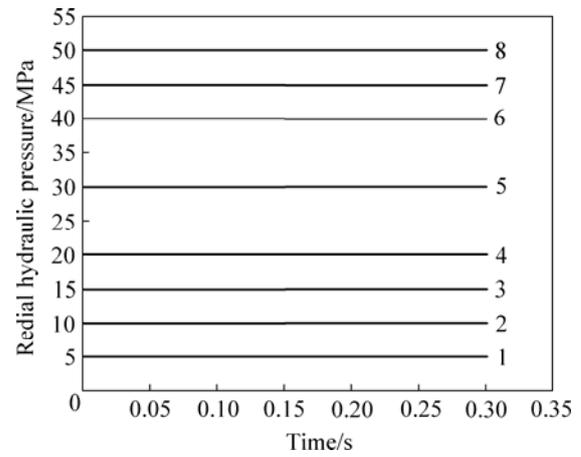


图 4 主动径向压力加载路径

Fig.4 Loading paths of independent radial hydraulic pressure

## 3 模拟结果分析

### 3.1 主动径向压力对成形零件缺陷的影响

通常板材拉深成形的缺陷形式为破裂和起皱。在液室压力确定的条件下, 主动径向压力路径的选取就直接影响到成形缺陷。当采用路径 1(5 MPa)进行主动径向加压时, 在拉深初期由于径向拉应力过大, 而所施加的主动径向压力较小, 不能使径向拉应力增加得到有效的缓解, 从而导致凸模运行 80 mm 时, 板料发生破裂, 如图 5 所示。

由于零件变形程度很高, 法兰区在成形过程中一直有起皱趋势, 故必须采用压边圈控制法兰区的起皱。当采用路径 8(50 MPa)进行主动径向加压时, 因为施加的主动径向压力很大, 使法兰区板料在径向压应力的作用下出现较大的径向压缩, 压边圈也失去了控制起皱的作用, 从而产生明显的起皱现象, 如图 6 所示。随着拉深的进行, 这些起皱将被带入凹模中, 使得到的筒形零件表面精度很差, 甚至破裂。

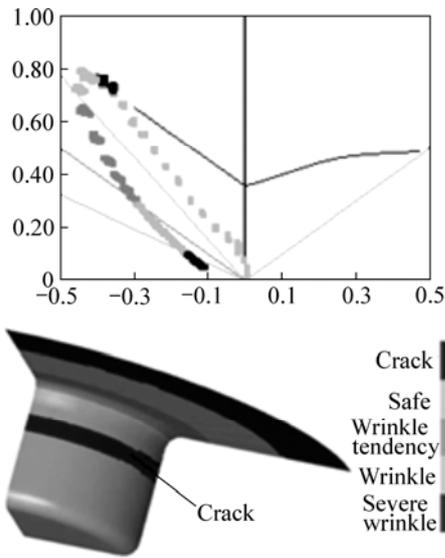


图 5 路径 1 径向压力 5 MPa 拉深初期破裂  
**Fig.5** Crack LDR when using path 1 of radial hydraulic pressure of 5 MPa at initial stage

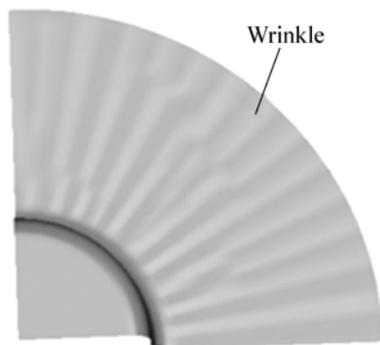


图 6 路径 8 径向压力为 50 MPa 时的法兰区起皱现象  
**Fig.6** Flange wrinkle when using path 10 of radial hydraulic pressure of 50 MPa

3.2 主动径向压力对成形零件壁厚分布的影响

液室压力和主动径向压力的作用会直接影响到零件的成形质量及壁厚分布。当采用路径 2~7 进行主动径向加压时均能成形, 但成形后的壁厚分布却有所不同。为了得到成形壁厚分布和主动径向压力之间的关系, 沿零件轴线方向取一截面, 测量截面上各点厚度, 绘制曲线如图 7 所示。从图中可看出, 随着主动径向压力的增加, 零件壁厚减薄量逐渐减小。由于液室压力产生的摩擦保持效应, 筒底部几乎没有减薄, 最薄处发生在零件侧壁靠近凸模圆角处, 即测量点 11 的位置, 而靠近零件口部均有所增厚。

通过模拟结果分析得知, 采用合理的液室压力与

主动径向压力匹配, 即当液室最大压力为 40 MPa, 主动径向压力为 45 MPa 时, 可有效地降低板料成形时的径向拉应力, 改善法兰区的应力状态, 使获得的零件壁厚分布比较均匀, 成形质量较高, 其最小壁厚为 0.895 4 mm。此成形零件壁厚分布如图 8 所示。

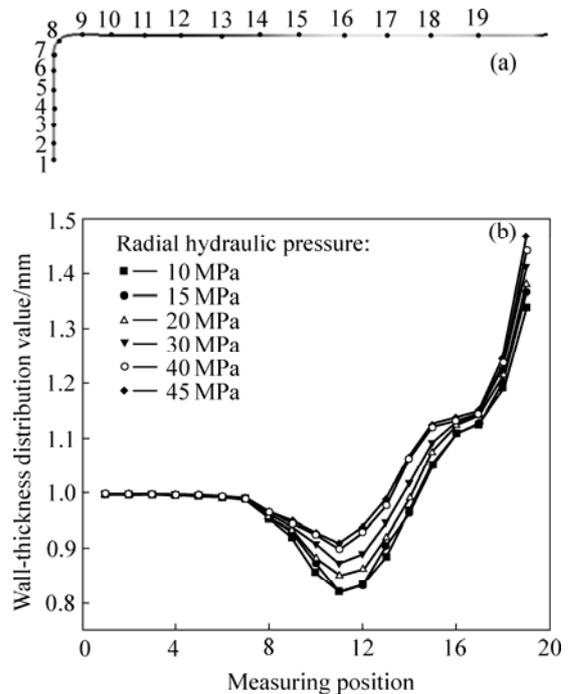


图 7 壁厚测量点位置及沿轴向零件壁厚分布图  
**Fig.7** Measuring positions and wall-thickness distribution along cup's axial: (a) Measuring positions of wall-thickness; (b) Wall-thickness distribution

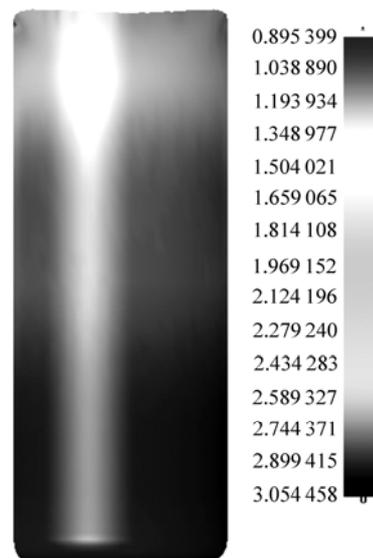


图 8 径向压力 45 MPa 时成形零件壁厚分布云图  
**Fig.8** Wall-thickness distribution of part with radial hydraulic pressure of 45 MPa

## 4 结论

1) 采用主动径向加压充液拉深技术,合理选取液室压力加载曲线和径向压力加载路径是提高铝镁合金等低塑性、难成形材料成形极限,获得较大拉深比的有效措施之一,可进一步扩大铝镁合金等轻质材料的应用范围。

2) 主动径向压力加载路径的选取对零件成形有较大影响。主动径向压力过小会在拉深初期产生破裂,过大则会使法兰区产生严重的起皱,造成零件表面精度不高。当主动径向压力为 20~45 MPa 时,成形零件壁厚分布较为均匀,获得的拉深比为 3.1。

3) 有限元数值模拟分析软件 ETA/Dynaform5.5 提供了充液拉深成形工艺所需的有效工艺参数,可以检验工艺方法的可行性和可靠性,减少了实验量。

## REFERENCES

- [1] 康达昌, 郎利辉, 张士宏, 王仲仁, 苑士剑. 充液拉深工艺的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2000, 32(5): 42-44.  
KANG Da-chang, LANG Li-hui, ZHANG Shi-hong, WANG Zhong-ren, YUAN Shi-jian. Hydrodynamic deep drawing process[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2000, 32(5): 42-44.
- [2] LANG L H, DANCKERT J, NIELSEN K B. Investigation into sheet hydroforming based on hydromechanical deep drawing with uniform pressure on the blank[J]. Proc Instn Mech Engrs, 2004, 218: 833-844.
- [3] 徐永超, 康达昌. 防锈铝的充液拉深研究[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(1): 60-64.  
XU Yong-chao, KANG Da-chang. Hydromechanical deep drawing of alumite LF6[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(1): 60-64.
- [4] NAKAMURA K, NAKAGAWA T, AMINO H. Various application of hydraulic counter pressure deep drawing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 71(1): 160-167.
- [5] 唐井林, 聂绍珉. 充液成形装置及锥形件充液拉深成形研究[J]. 塑性工程学报, 2001, 8(3): 32-34.  
TANG Jing-lin, NIE Shao-min. A equipment for hydroforming and research on hydroforming technology on conical parts[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2001, 8(3): 32-34.
- [6] LANG L H, DANCKERT J, NIELSEN K B, ZHOU X B. Investigation into the forming of a complex cup locally constrained by a round die based on an innovative hydromechanical deep drawing method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 167: 191-200.
- [7] QIN Y, BALENDRA R. Design consideration for hydromechanical deep drawing of sheet components with concave features[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 145: 163-170.
- [8] ZHANG S H, JENSEN M R, NIELSEN K B, DANCKERT J, LANG L H, KANG D C. Effect of anisotropy and prebulging on hydromechanical deep drawing of mild steel cups[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 142: 544-550.
- [9] 于忠奇, 赵亦希, 林忠钦. 汽车用铝合金板拉深性能评估参数[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(10): 1689-1693.  
YU Zhong-qi, ZHAO Yi-xi, LIN Zhong-qin. Evaluation parameter of drawability of automotive aluminum alloy sheets[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(10): 1689-1693.
- [10] ZHANG S H, WANG Z R, XU Y. Recent developments in sheet hydroforming technology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151: 237-2414.
- [11] KANG D C, CHEN Y, XU Y C. Hydromechanical deep drawing of superalloy cups[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 166: 243-246.
- [12] 林忠钦, 于忠奇, 孙成智, 陈关龙. 变压边力条件下铝合金板的成形窗口[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(8): 1162-1166.  
LIN Zhong-qin, YU Zhong-qi, SUN Cheng-zhi, CHEN Guan-long. Formability window of aluminium alloy sheet at variable blank-holder force[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(8): 1162-1166.
- [13] 李涛, 郎利辉, 安冬洋, 王玲. 复杂薄壁零件板多级充液成形及过程数值模拟[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(7): 830-833.  
LI Tao, LANG Li-hui, AN Dong-yang, WANG Ling. Multi sheet hydroforming of complicated thin wall part and numerical simulation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(7): 830-833.
- [14] 林忠钦. 车身覆盖件冲压成形仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 118-120.  
LIN Zhong-qin. Simulation of stamping of autobody panel[M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 118-120.
- [15] 陈文亮. 板料成形 CAE 分析教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 42-43.  
CHEN Wen-liang. CAE analysis tutorial of sheets' forming[M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 42-43.
- [16] 赵升吨, 杨玉海, 王骥. 筒形件新型充液拉深的数值模拟及工艺机理分析[J]. 塑性工程学报, 2003, 10(1): 65-70.  
ZHAO Sheng-dun, YANG Yu-hai, WANG Ji. Numerical simulation and process mechanism analysis on the new kind of hydraulic deep drawing of cylindrical cups[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2003, 10(1): 65-70.

(编辑 何学锋)