

[文章编号] 1004-0609(2002)01-0071-05

铝板/塑料混合成型中铝板大塑性变形区的有限元分析^①

陈明安^{1, 2}, 张新明¹

(1. 中南大学 材料科学与工程系, 长沙 410083; 2. 湖南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410082)

[摘 要] 采用弹塑性大变形更新的 Lagrange 有限元方法研究了铝板/塑料混合成型过程中铝板的成形过程和变形特点。结果表明, 当塑料熔体压力从 30 MPa 增大到 50 MPa 时, 铝板凸缘区已基本不再参与变形, 铝板上两个板厚减薄较严重的大塑性变形区在此阶段形成。模底接触区与自由变形区交界处的大塑性变形区依次处于板料曲面内双向伸长变形和平面应变状态; 模腔入口圆角区与自由变形区交界处的大塑性变形区由两部分构成, 其中与模壁接触部分依次处于板料曲面内双向伸长变形、拉伸变形和平面应变状态, 另一部分依次处于板料曲面内双向伸长变形和平面应变状态。

[关键词] 金属板料成形; 液压成形; 塑料注射成型; 有限元; 铝板

[中图分类号] TG 386.41

[文献标识码] A

金属/塑料的宏观复合制件由两种不同种类且性能相差很大的材料构成^[1~5]。在其混合成型过程中, 塑料熔体压力是金属板料成形的动力, 成形的金属板料成为塑料注射成型的模腔^[6]。加压的塑料熔体类似于金属板料液压成型中的加压流体介质^[7~9]。显然, 混合成型过程中金属板料的成形过程及其变形特点是研究开发这种新工艺中确定成型工艺参数、设计模具时需弄清的。实验表明, 混合成型后在铝板自由变形区两端形成两个大塑性变形区, 板厚减薄较严重, 是混合成型中铝板成形时最易出现破裂的地方。实际上, 当金属板料在平底凹模中进行液压成形和液压胀形过程中也有类似的板厚严重减薄处的开裂现象^[10, 11], 但迄今尚未见分析和研究该大塑性变形区形成过程以及材料变形模式的文献报导。本文作者采用弹塑性大变形更新的 Lagrange 有限元方法对混合成形中铝板的成形过程进行了分析, 为金属板料/塑料混合成型的工艺研究提供依据。

1 实验方法及结果

混合成型试验在螺杆式塑料注射成型机上进行。螺杆直径为 d_{22} mm, 最大注射压力为 202 MPa。金属板料为 d_{50} mm $\times$ 1 mm 的半硬状态纯铝板。模腔直径为 d_{38} mm, 深 4 mm, 入口处圆角半径为 2 mm。塑料材料为聚丙烯 PP, 注射速率为

4.35 cm³/s, 注射温度为 230 °C, 注射压力为 116 MPa, 实验测定模腔末端的熔体压力为 50.2 MPa。图 1 所示为实验所得制件的剖面图, 并利用工具显微镜测量了两个板厚减薄较严重的大塑性变形区的最小厚度。

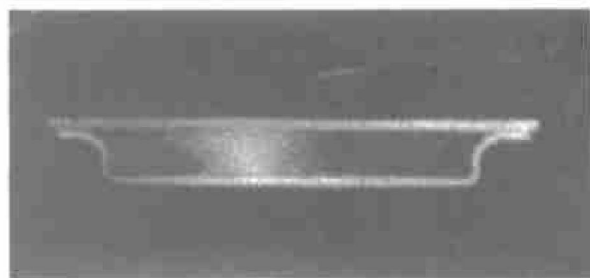


图 1 混合成型试验所得制件的剖切截面

Fig. 1 Sectional view of formed aluminum/plastic combined component

2 有限元模型

由于混合成型中金属板料的成形过程是一个大塑性变形过程, 因此采用弹塑性大变形更新的 Lagrange 方法^[12]对其成形过程进行数值模拟。将铝板成形作为轴对称问题处理。为了较好地描述板料变形时的弯曲效应以及板厚方向上的应力、应变变化特点, 在板厚方向上设置 4 层单元, 用 4×65 个单元将其一半离散化, 如图 2 所示。采用的单元为 4 个高斯积分点的四边形轴对称单元。模板及模腔

① [收稿日期] 2001-03-02; [修订日期] 2001-06-28

[作者简介] 陈明安(1964-), 男, 副教授, 博士。

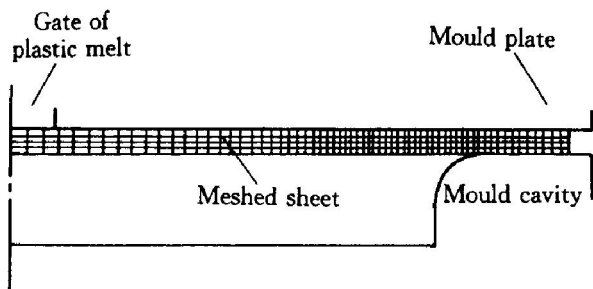


图 2 有限元网格

Fig. 2 Finite element meshes of aluminum sheet

均作为刚体处理。

铝板的弹性模量 $E = 70 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.33$, 初始屈服极限 $\sigma_s = 70 \text{ MPa}$, 抗拉强度 $\sigma_b = 100 \text{ MPa}$, 且为服从 von Mises 屈服准则的各向同性强化的弹塑性材料。尽管混合成型中塑料熔体温度为 230°C , 但由于塑料熔体压力在 1.2 s 内迅速上升到最大值, 故可忽略塑料熔体温度对铝板力学性能的影响, 并认为塑料熔体压力分布均匀, 熔体最大压力为 50 MPa 。

铝板与模具的摩擦因数为 0.05 , 并采用考虑相对滑动速度影响的摩擦规律^[12], 则有

$$F_t = \mu F_n (2/\pi) \arctan(v_r/C)$$

式中 F_t —摩擦力, μ —摩擦因数, F_n —正压力, v_r —相对滑动速度, C —比 v_r 小得多的正值常数。注意到, C 取值过小将导致收敛困难, C 取值过大又几乎表现不出摩擦的影响。本文中 C 取值为 $6 \times 10^{-2} v_r$ 。

铝板有限元节点与模具的接触条件为: 当节点与模壁之间的距离小于或等于所有单元中的最小边长的 $1/25$ 时, 即认为该节点与模具处于接触状态; 否则, 则处于非接触状态。

铝板成形过程的有限元数值模拟在大型非线性分析有限元软件 MARC^[12] 上进行, 并用交互式的 MENTAT II 软件进行有限元分析的前、后置处理。

3 分析与讨论

3.1 铝板成形过程分析

图 3 给出混合成型过程中铝板边缘位移与塑料熔体压力的关系。在注塑机的合模锁紧过程中, 铝板凸缘被夹紧, 并在厚度方向上被压下 0.05 mm , 板料边缘朝外移动约 0.2 mm 。随后, 注塑机注射的塑料熔体迫使铝板在模腔内成形, 板料边缘朝内移动。铝板与模具的接触面积不断增大, 塑料熔体压

力也不断升高。但当塑料熔体压力上升到约 30 MPa 后, 铝板边缘的朝内移动基本停止, 这说明铝板凸缘区已基本不再参与变形。在塑料熔体压力从 0 上升到约 30 MPa 的过程中, 铝板凸缘区处于拉伸变形状态, 铝板边缘的朝内移动量逐渐增大; 而模腔内的铝板承受板料曲面内双向伸长变形。研究表明, 金属板料液压成形过程中凸缘材料朝内移动有利于减轻模腔内铝板的胀形变形程度^[7, 8, 10]。这说明, 混合成型过程中铝板厚度减薄较严重的大塑性变形区是在凸缘区停止变形后, 即塑料熔体压力从约 30 MPa 上升到 50 MPa 的过程中形成的。

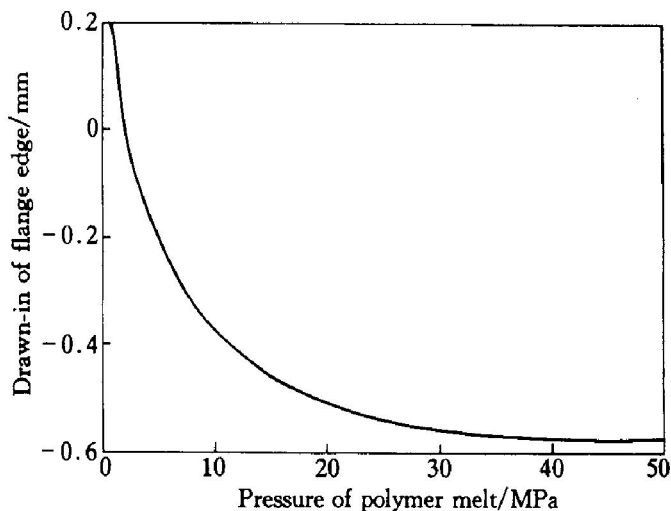


图 3 混合成型中铝板边缘位移与塑料熔体压力的关系

Fig. 3 Relationship between draw in of flange edge of aluminum sheet and pressure of polymer melt in hybrid forming

3.2 大塑性变形区的形成及变形特点

图 4 给出了塑料熔体压力为 50 MPa 时模腔底角部附近铝板内最大主塑性应变 $\epsilon_{\max}$, 最小主塑性应变 $\epsilon_{\min}$, 周向塑性应变 ϵ_{33} 和等效塑性应变 ϵ_1 的等值线场图。将成形铝板分为 4 个区域: 凸缘区(记为 I 区)、模腔入口圆角区(记为 II 区)、与模底接触区(记为 III 区)和自由变形区(记为 IV 区)。由图 4 可见, 铝板成形过程中在 II 区与 IV 区以及 III 区与 IV 区的交界处形成两个板厚减薄较严重的大塑性变形区, 其位置与图 1 的混合成型实验铝板上两个板厚减薄最严重的区域相对应。II 区与 IV 区交界处最小厚度的实测值为 0.702 mm , 有限元模拟值为 0.738 mm ; III 区与 IV 区交界处最小厚度的实测值为 0.643 mm , 有限元模拟值为 0.725 mm 。可见, 有限元模拟结果与实验结果具有较好的相符性。

图 5 给出混合成型过程中塑料熔体压力分别为 30 MPa , 40 MPa 和 50 MPa 时模腔底角部附近铝板内绝对值最大的主塑性应变的等值线场图。由图 4

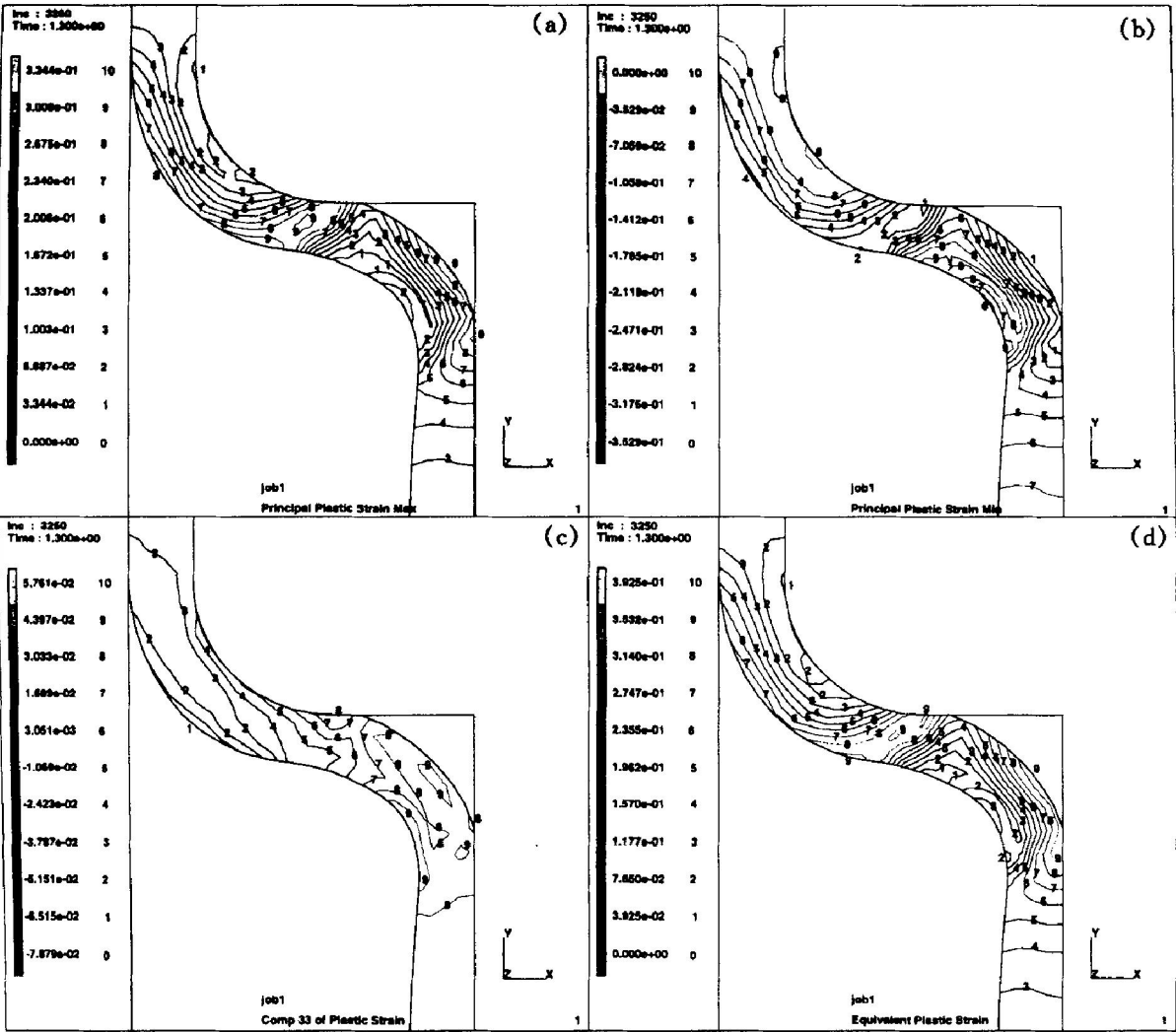


图 4 塑料熔体压力为 50 MPa 时模腔底部角附近铝板内塑性应变等值线场图

Fig. 4 Distribution of plastic strain in formed aluminum sheet around root corner of mould at plastic melt pressure of 50 MPa

(a) —Maximum principal strain, $\epsilon_{\max}$; (b) —Minimum principal strain, $\epsilon_{\min}$;
(c) —Circumferential strain, ϵ_{33} ; (d) —Equivalent strain, ϵ

及图 5 可知, II 区处于径向拉伸-周向压缩变形状态, IV 区处于径向拉伸-周向伸长变形状态。由于板料曲面弯曲效应, II 区与 IV 区沿板厚方向呈现明显的应变梯度。在图 5 中, II 区与 IV 区交界处板厚减薄较严重的大塑性变形区由两部分构成, 分别记为 B 和 C; III 区与 IV 区交界处板厚减薄较严重的大塑性变形区记为 A。从 A、B 和 C 3 个区域中各取 1 个节点, 给出这 3 个节点的周向塑性应变 ϵ_{33} 随混合成型过程中塑料熔体压力的变化情况, 如图 6 所示。当塑料熔体压力从 30 MPa 增大到 50 MPa 时, A 区的 ϵ_{33} 为正, 且随塑料熔体压力增大而逐渐增大, 当塑料熔体压力增大到 40 MPa 后, ϵ_{33} 基本不变, 因此 A 区依次处于板料曲面内双向伸长变形和平面应变状态; 对于 B 区, ϵ_{33} 逐渐增大, 然后逐渐减小, 最后基本不变, 因此 B 区依次处于板料曲

面内双向伸长变形、拉伸变形和平面应变状态; 对于 C 区, ϵ_{33} 先增大, 然后基本不变, 因此 C 区依次处于板料曲面内双向伸长变形和平面应变状态。图 6 亦给出了塑料熔体压力从 50 MPa 增大到 60 MPa 时 ϵ_{33} 的变化情况。可见, C 区的 ϵ_{33} 基本不变, 处于平面应变状态; A 区和 B 区的 ϵ_{33} 从基本不变转变到增大, 因此变形由平面应变状态转变到板料曲面内双向伸长变形状态。显然, 板厚减薄较严重的大塑性变形区的变形程度随塑料熔体压力增大而增大和板厚减薄而更严重。这将导致混合成型过程中铝板成形时板厚减薄严重的地方出现破裂现象。

为了避免出现破裂现象, 应使更多的材料从板料凸缘区流入模腔内。为此, 一方面应尽可能采用较大的模具入口圆角半径, 减小板料凸缘区与模具

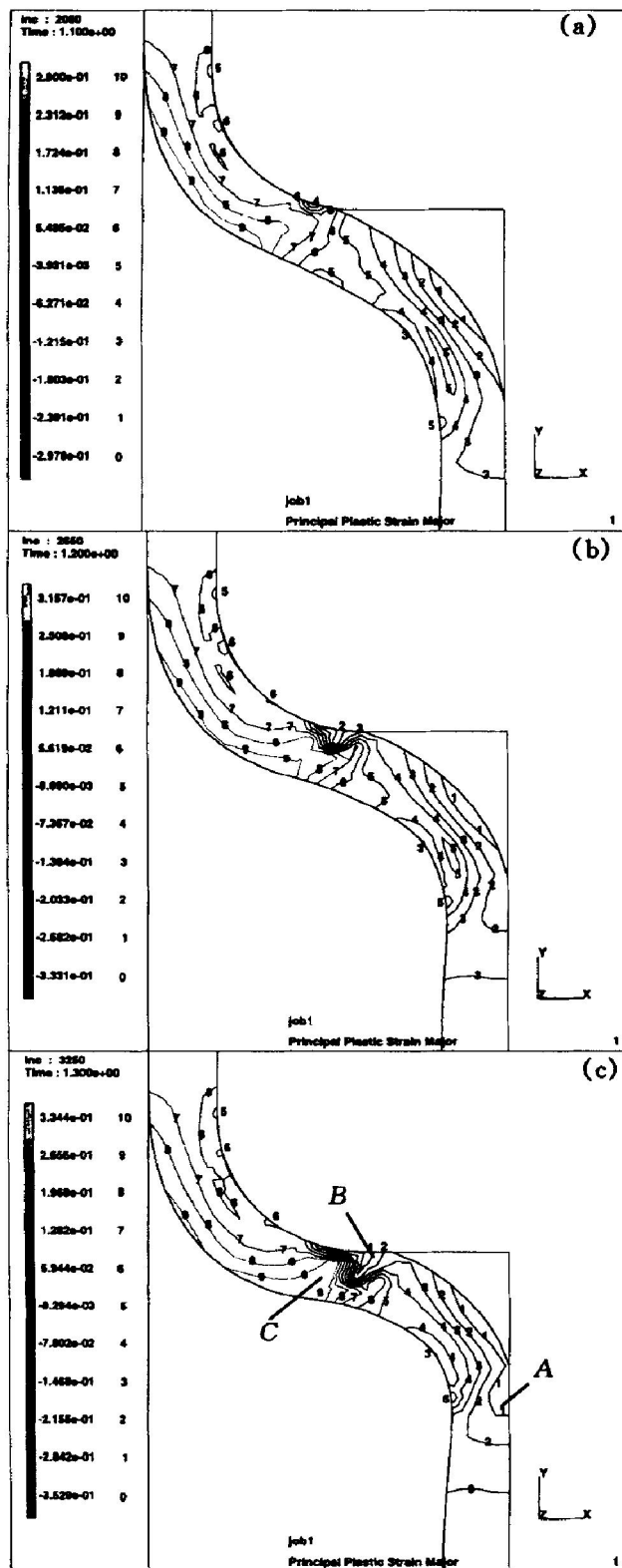


图 5 塑料熔体压力为 30 MPa、40 MPa 和 50 MPa 时模腔底部角部附近铝板内绝对值最大的主塑性应变的等值线图

Fig. 5 Distribution of major principal plastic strain in aluminum sheet around root corner of mould at plastic melt pressure of 30 MPa (a), 40 MPa (b) and 50 MPa (c)

的摩擦因数, 另一方面对板料凸缘区施加较小的板厚压下量, 甚至采用零压下量。这是由于作为板料

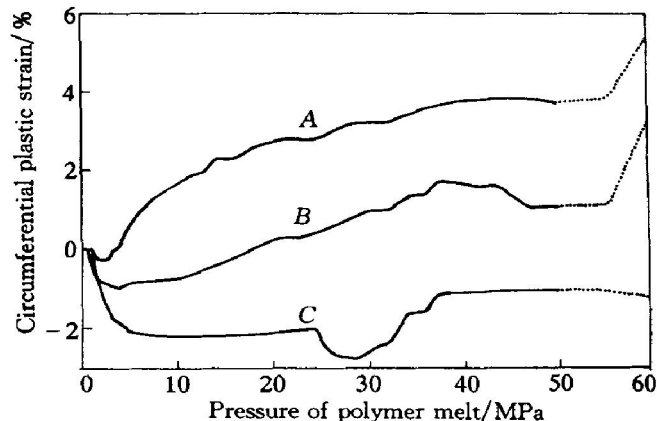


图 6 混合成型过程中 A、B 和 C 区周向塑性应变 ε_{33} 的变化

Fig. 6 Evolution of circumferential plastic strain in regions of A, B and C in hybrid forming of aluminum sheet

成形介质的塑料熔体的粘度比水、油等介质的, 且其粘度随塑料熔体温度降低而快速增大。因此, 只要板料凸缘区与模具的间隙不超过注塑模具分型面的缝隙(约 0.01~0.03 mm), 则混合成型过程中不会出现塑料熔体渗漏现象。

4 结论

1) 在塑料熔体压力从 0 上升到约 30 MPa 的过程中, 铝板凸缘区处于拉伸变形状态, 铝板边缘的朝内移动量逐渐增大; 而模腔内的铝板承受板料曲面内双向伸长变形。

2) 当塑料熔体压力上升到约 30 MPa 后, 铝板边缘的朝内移动基本停止, 凸缘区已基本不再参与变形, 并在铝板自由变形区两端形成两个板厚减薄较严重的大塑性变形区。

3) 采用弹塑性大变形更新的 Lagrange 有限元方法分析了板厚严重减薄的大塑性变形区的形成过程及材料变形模式。当塑料熔体压力从 30 MPa 增大到 50 MPa 时, A 区依次处于板料曲面内双向伸长变形和平面应变状态; II 区与 IV 区交界处板厚减薄较严重的大塑性变形区由 B 和 C 两部分构成, B 区依次处于板料曲面内双向伸长变形、拉伸变形和平面应变状态, C 区依次处于板料曲面内双向伸长变形和平面应变状态。

[REFERENCES]

[1] Karlsson K F, Astron B T. Manufacturing and applications of structural sandwich components [J]. Compos-

- ites, 1997, 28A: 97– 111.
- [2] Delmonte J. Metal/polymer Composites [M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [3] Altenpohl D G. Aluminum [M]. Washington D C. The Aluminum Asso Inc, 1998.
- [4] Ohwue T, Usuda M, Nakagawa T. Influence of temperature on mechanical properties of steel/plastic laminates [J]. J JSTP, 1998, 39: 201– 205.
- [5] Kim J K, Yu T X. Forming and failure behaviour of coated, laminated and sandwiched sheet metals: a review [J]. J Mater Processing Tech, 1997, 63: 33– 42.
- [6] CHEN Ming-an, ZHANG Xin-ming, et al. A new approach to manufacturing of metal/polymer sandwiched components-hybrid forming [A]. Proc of 1st Int Conf on Mech Engn, edited by Chinese J Mech Eng [C]. Shanghai, 2000. 579.
- [7] Schmoeckel D, Hielscher C, Huber R, et al. Metal forming of tubes and sheets with liquid and other flexible media [J]. Annals CIRP, 1999, 48(2): 497– 513.
- [8] Zhang S H. Developments in hydroforming [J]. J Mater Processing Tech, 1999, 91: 236– 244.
- [9] LANG Li-hui, KANG Da-chang, ZHANG Shi-hong, et al. Key technologies of numerical simulation of cup hydrodynamic deep drawing [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2000, 10(6): 772– 776.
- [10] Hein P, Vollertsen F. Hydroforming of sheet metal pairs [J]. J Mater Processing Tech, 1999, 87: 154– 164.
- [11] Lee W B, Ma Z R. Prediction of the limiting shape and die-height in the hydraulic bulge-forming of a circular cup [J]. J Mater Processing Tech, 1995, 51: 309– 320.
- [12] MARC manuals A-F. MARC analysis Research Corporation [R]. Palo Alto, California, RK7, 1997.

Finite element analysis of highly strained zones of formed aluminum sheet by hybrid forming of sheet metal and plastic

CHEN Ming-an^{1, 2}, Zhang Xin-ming¹

(1. Department of Materials Science and Engineering, Central South University,
Changsha 410083, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

[Abstract] The forming process and the deformation characteristics of the aluminum sheet during hybrid forming have been analyzed by the updated Lagrangian finite element method. The results show that the flange of the aluminum sheet has almost no any further deformation and that two highly strained zones with severe thickness reduction are developed when the plastic melt pressure increases from 30 MPa to 50 MPa. The zone between the region contacted with bottom of the mould and the free forming region shows stretch forming and then transferred to plane strain state. Another zone between the mould entry region and the free forming region is constituted with two parts. One neighboring to side-wall of the mould shows stretch forming, and then transferred to deep drawing and finally to plane strain state, and the other shows stretch forming and then transferred to plane strain state.

[Key words] sheet metal forming; hydroforming; plastic injection molding; finite element method; aluminum sheet

(编辑 杨 兵)