

文章编号: 1004-0609(2004)01-0088-05

非平底凹模铝板/塑料复合成形中铝板大塑性变形分析^①

陈明安¹, 周卓夫², 张新明¹

(1. 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083; 2. 长沙通信职业技术学院 数学系, 长沙 410015)

摘 要: 在注塑机上利用非平底凹模制备了形状较复杂的铝板/聚丙烯复合结构件, 实现了将金属板料成形、塑料注射成形融为一体的复合成形新工艺。利用弹塑性大变形更新的 Lagrange 有限元法对于复合成形中铝板成形过程进行了数值模拟。成形铝板的实验测试厚度与有限元模拟值具有良好的相符性。铝板成形中形成 3 个板厚减薄较严重的区域。板厚减薄严重的 II 区, 发生了胀形变形和剧烈的塑性剪切变形。I 区和 IV 区之间的大塑性变形区分为 B 区和 C 区 2 个部分, B 区内绝对值最大的主塑性应变为负, C 区内绝对值最大的主塑性应变为正。III 区与 IV 区之间的 D 区绝对值最大的主塑性应变为负。

关键词: 铝板成形; 塑料注射成形; 塑性变形; 有限元

中图分类号: TG386

文献标识码: A

Deformation analysis of heavily strained zones in forming of aluminum sheet via plastics injection molding with mold of non-flat bottom

CHEN Ming-an¹, ZHOU Zhuo-fu², ZHANG Xin-ming¹

(1. School of Materials Science and Engineering,

Central South University, Changsha 410083, China;

2. Department of Mathematics, College of Changsha Communication Technology,
Changsha 410015, China)

Abstract: A newly developed approach, in which sheet metal forming and plastics injection molding are integrated, was used to manufacture complex components combined with aluminum sheet and polypropylene with the mold of non-flat bottom via plastics injection molding machine. The updated elastic-plastic Lagrange finite element formulation was used to simulate the forming process of the aluminum sheet. The simulation results agree to the experiment. It is shown that three heavily strained regions were formed in the aluminum sheet. In the most heavily strained region II, the deformation is in combination of stretching forming of the sheet and severe plastic shear. The second heavily strained region can be divided into zone B with negative major principal plastic strain and zone C with positive major principal plastic strain. The third largest strained region is in negative major principal plastic strain.

Key words: aluminum sheet forming; plastics injection molding; plastic deformation; finite element method

金属/塑料的宏观复合材料制件具有质量轻、隔热保温、消音减振等突出特点^[1~4], 是一种具有较好应用前景的结构构件^[5~7], 但其成形困难、工序复杂^[2]。作者近期研究了一种利用注塑机将金属板料成形、塑料注射成形和塑料与金属板料的粘接

融合一体的制造金属板料/塑料宏观复合制件的复合成形新工艺^[8]。在这种成形方法中, 塑料熔体压力是金属板料成形的动力, 加压的塑料熔体类似于金属板料液压成形中的加压流体介质。与金属板料液压成形不同的是, 成形的金属板料又作为塑料注

① 收稿日期: 2003-02-20; 修订日期: 2003-05-23

作者简介: 陈明安(1964-), 男, 博士, 教授。

通讯作者: 陈明安, 电话: 0731-8830265; E-mail: marenchen@vip.163.com

射成形的模腔。

应用该复合成形方法制造复杂轮廓形状结构零件时, 塑料处于高温高压的熔体状态。根据塑料注射成形原理, 塑料熔体能够充填结构零件轮廓形状较复杂的部位。但与板料液压成形类似^[9-12], 复合成形中金属板料的轮廓形状也受到金属板料成形极限的限制。复合成形过程中金属板料的不同区域呈现何种变形模式以及是否出现可能导致破裂的板料厚度严重减薄的大塑性变形区, 这种大塑性变形区如何演变形以及成形后金属板料的厚度分布状态, 都是研究开发这种新工艺、确定成形工艺参数、设计模具时需弄清的问题。

本文针对一种非平底凹模结构, 采用弹塑性大变形更新的 Lagrange 有限元方法模拟复合成形中铝板成形过程, 设计并在注塑机上进行复合成形实验, 以揭示铝板大塑性变形区的变形特点。

1 复合成形实验及有限元模型

将 2 块经过表面处理的铝板放在复合成形模具内, 通过注塑机的合模系统闭合模具、将铝板边缘夹紧, 并锁紧模具。然后通过注塑机将已塑化的塑料熔体经模具中心浇口注入。随着塑料熔体不断注入, 铝板变形不断增大, 直至注塑机注射压力达到设定值为止。随后在注塑机保压压力作用下, 塑料熔体冷却凝固成形, 并与铝板粘接构成铝板与塑料的宏观复合制件。复合成形试验的铝板为厚度 1mm, 直径 50mm 的半硬状态纯铝板。模腔直径为 38mm, 其深度为 4mm, 入口处圆角半径为 2mm。塑料为聚丙烯 PP, 注射速率为 $4.35\text{cm}^3/\text{s}$, 注射温度为 230°C , 注射压力为 116MPa , 实验测定模腔末端的熔体压力为 50.2MPa 。图 1 所示为试验所得制件的剖切截面。利用工具显微镜测量了板厚。

将铝板成形作为轴对称问题处理, 采用弹塑性大变形有限元更新的 Lagrange 方法对其大塑性变形过程进行数值模拟。选用四边形轴对称单元, 离

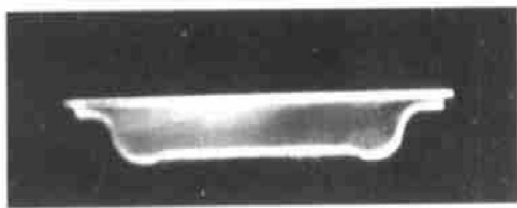


图 1 非平底凹模复合成形件的剖切照片

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

散化的有限元单元如图 2 所示。

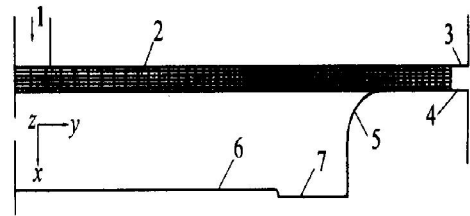


图 2 有限元网格

Fig. 2 Finite element meshes of aluminum sheet

- 1—Gate of plastic melt; 2—Meshed sheet;
3—Mold plate, 4—Mold cavity;
5—Round corner of mold cavity;
6—Mold bottom 1; 7—Mold bottom 2

根据实验测试, 塑料熔体压力在 1.2s 内迅速上升到最大值, 故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均匀分布, 熔体最大压力取为 50MPa ^[13]。铝板的弹性模量为 70GPa , 泊松比为 0.33, 初始屈服极限为 70MPa , 抗拉强度为 100MPa , 且为服从 von Mises 屈服准则的各向同性强化的弹塑性材料。模板及模腔均作为刚体处理。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 0.04 时, 即认为该节点与模具处于接触状态。铝板与模具的摩擦系数为 0.05, 并采用考虑相对滑动速度影响的摩擦规律^[14]。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 上进行。

2 铝板成形过程的变形特点

2.1 铝板成形过程分析

图 3 给出了复合成形过程中铝板凸缘外端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, 并在厚向上被压下 0.05mm , 板料凸缘外端朝外移动约 0.2mm 。随后, 注塑机注射的塑料熔体迫使铝板在模腔内成形, 板料凸缘朝内移动。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, 板料凸缘朝内移动速度逐渐减小。当塑料熔体压力上升到约 26MPa 后, 铝板凸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进一步的塑性变形。根据板料凸缘移动情况, 可将铝薄板成形过程分为 3 个阶段: 1) 合模锁紧铝板凸缘阶段, 此时板料凸缘外端朝外移动; 2)

开始注射塑料至塑料熔体压力上升到约 26MPa, 此阶段板料凸缘朝内移动; 3) 塑料熔体压力从约 26MPa 继续上升, 此阶段板料凸缘朝内移动基本停止。

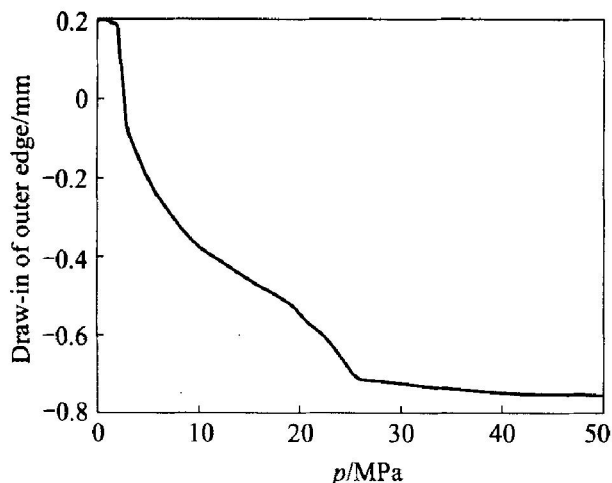


图 3 铝板边缘位移与塑料熔体压力的关系

Fig. 3 Draw-in of outer edge of aluminum sheet in forming process

图 4 给出复合成形中铝板成形后的变形网格图。为便于说明, 将图 4 的相关区域标记为: 模腔入口圆角区 (I 区), 模底区 1 和 2 之间的圆角过渡区 (II 区), 与模底区 2 接触区 (III 区), I 区与 III 区之间的自由变形区 (IV 区)。由图可见, I 区、IV 区网格发生了明显的弯曲变形; II 区网格发生了较严重的畸变, 并形成了 3 个板厚明显减薄的大塑性变形区。II 区最小厚度的实验测试值为 0.658mm, I 区与 IV 区交界处的最小厚度的实验测试值为 0.748mm, III 区与 IV 区交界处的最小厚度的实验测试值为 0.808mm。

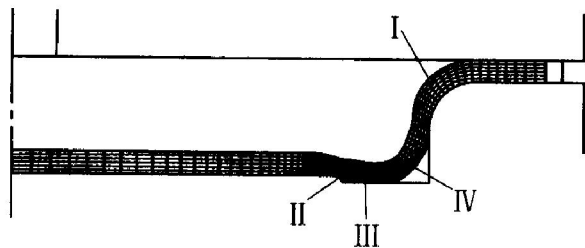


图 4 铝板成形后的变形网格图

Fig. 4 Deformed meshes of aluminum sheet

2.2 铝板成形中大塑性变形区的形成

图 5 给出了复合成形过程中模腔底角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} 、塑性剪应变 ϵ_{12} 的等值线场图。图 6 给出了不同塑料熔体压力下绝对值最大的主塑性

应变的等值线场图。

由图可见, 在 I 区, 发生了明显的弯曲变形, 板厚方向上存在明显的塑性变形梯度。该区内材料的 $\epsilon_{\max}$ 为正, $\epsilon_{\min}$ 为负, ϵ_{33} 为负。由图 6 可见, 其绝对值最大的主塑性应变为正。因此, 板料径向为伸长变形, 周向为压缩变形, 导致板厚方向的压缩变形。

当塑料熔体压力增大时, 首先在 II 区形成一个贯通整个板厚的大塑性变形区, 板厚明显减薄。由图 5 可见, 该区内 $\epsilon_{\max}$ 为正, $\epsilon_{\min}$ 为负, ϵ_{33} 为正。由图 6 可见, 绝对值最大的主塑性应变为负。由图 5(d) 可见, 该区内发生了剧烈的塑性剪切变形, 且变形梯度大。该区材料塑性变形的特点是: 1) 周向为伸长变形、径向为伸长变形, 导致板厚方向的压缩变形, 即材料处于板面内双向伸长变形状态-胀形变形状态; 2) 由于模底轮廓形状的急剧变化以及小圆角半径, 引起了剧烈的塑性剪切变形。当塑料熔体压力增大到约 25MPa 时, 板料变形到与模底 2 接触, 形成 III 区^[13]。当塑料熔体压力增大到约 28MPa 时, II 区内 $\epsilon_{\max}$, ϵ_{33} 和 $\epsilon_{\min}$ 基本不再变化^[13], 说明该区已停止变形, 形成一个板厚减薄严重的大塑性变形区。

当塑料熔体压力从约 25MPa 增大时, 变形到与模底 2 接触的 II 区增大。由图 5(c) 可见, II 区内 ϵ_{33} 为正。由图 6 可见, II 区内绝对值最大的主塑性应变为负。因此, 结合图 5, 该区内周向为伸长变形、径向为伸长变形, 导致板厚方向的压缩变形, 即材料处于板面内双向伸长变形状态-胀形变形状态。

IV 区是尚未与模腔接触的自由变形区。由图 5 可见, ϵ_{33} 为正、 $\epsilon_{\max}$ 为正、 $\epsilon_{\min}$ 为负, 变形呈现弯曲变形的分布特点, 且发生了较大的塑性剪切变形。由图 6 可见, 该区内绝对值最大的主塑性应变为负。因此, 该区内材料周向为伸长变形、径向为伸长变形, 导致板厚方向的压缩变形, 即材料处于板面内双向伸长变形状态-胀形变形状态。而且由于伴随发生弯曲变形, 导致较大的塑性剪切变形, 并使变形呈现弯曲变形的分布特点。塑料熔体压力越大, 成形板料的圆角半径越小。

由图 6 可见, 在板料的 I 区与 IV 区的交界处、III 区与 IV 区的交界处各形成一个塑性变形程度较大、板厚减薄较严重的塑性变形区。根据图 6(c) 所示绝对值最大的主塑性应变的等值线场图, 将 I 区和 IV 区之间的大塑性变形区划分为 C 区和靠近模腔侧壁的 B 区两部分。由图 5(c) 可见, B 区材料的 ϵ_{33} 为正, C 区内 ϵ_{33} 为负。由图 6(c) 可见, B 区内绝对值最大的主塑性应变为负, C 区内绝对值最大的

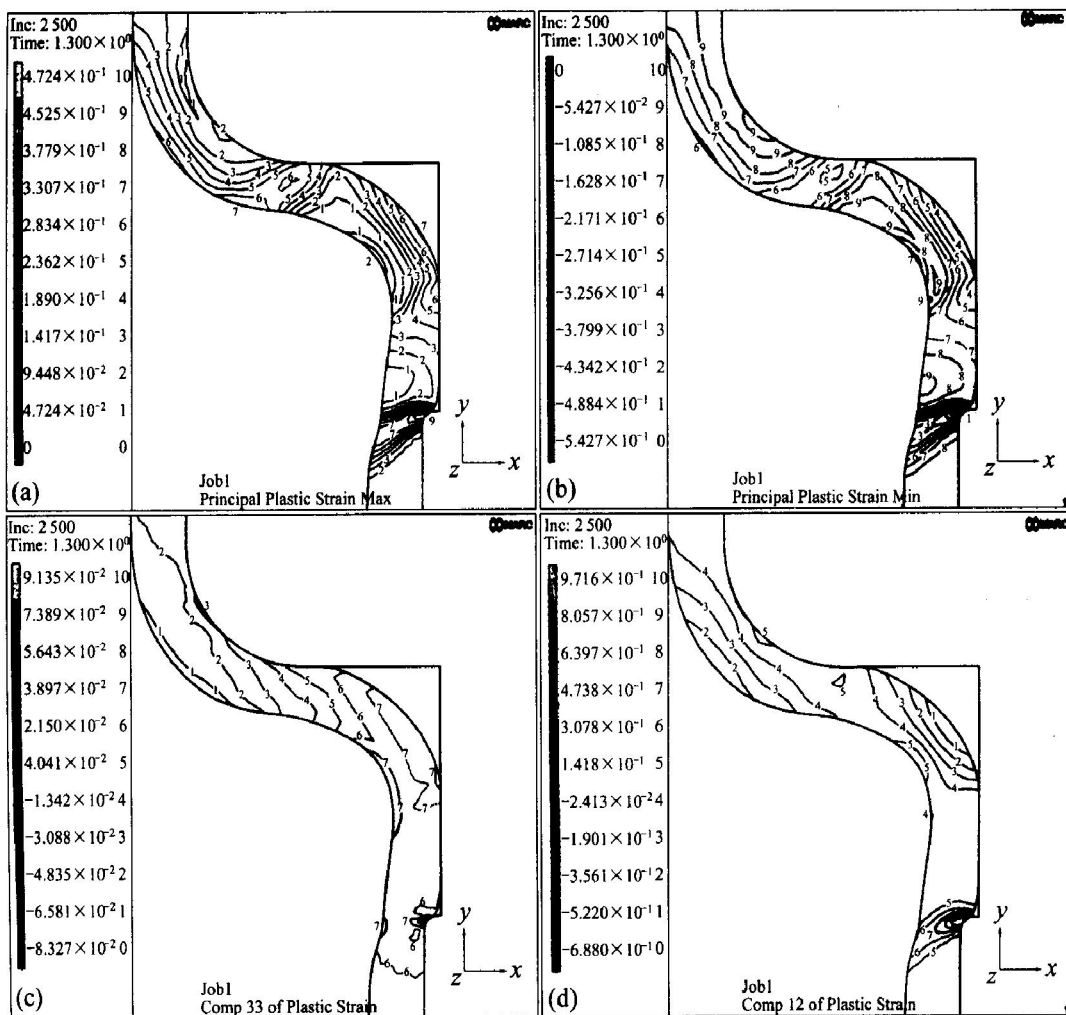


图 5 塑料熔体压力 50MPa 时模腔底角附近铝板内塑性应变等值线场图

Fig. 5 Distribution of plastic strains in formed aluminum sheet around root corner of mould at plastics melt pressure of 50MPa

(a) $-\epsilon_{\max}$; (b) $-\epsilon_{\min}$; (c) $-\epsilon_{33}$; (d) $-\epsilon_{12}$

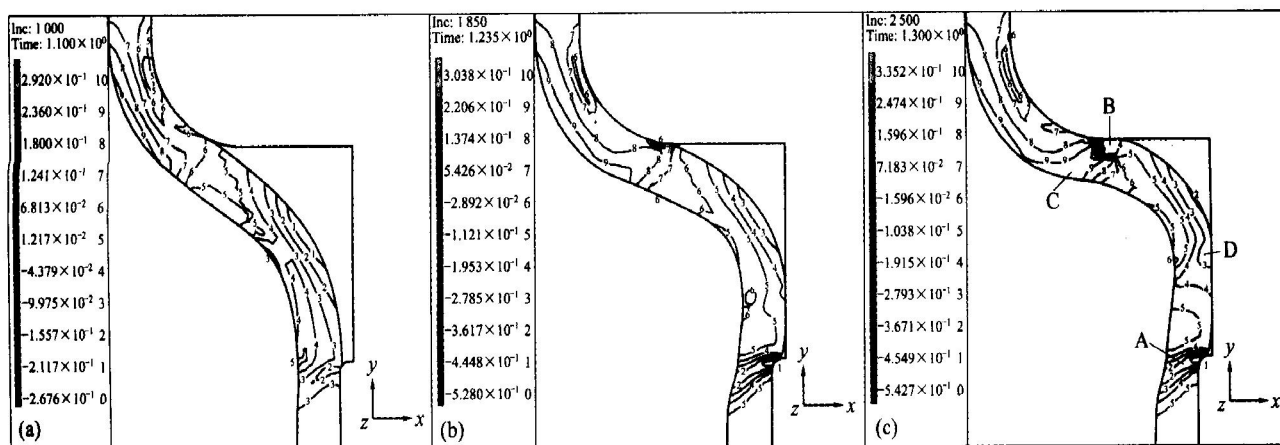


图 6 模腔底角部附近铝板内绝对值最大的主塑性应变的等值线场图

Fig. 6 Major principal plastic strains in aluminum sheet around root corner of mould during hybrid forming process at plastics melt pressure (a) -20MPa; (b) -32MPa; (c) -50MPa

主塑性应变为正。对于图 6(c) 中 III 区与 IV 区之间的 D 区, 其绝对值最大的主塑性应变为负; 由图 5(c)

可见, 其 ϵ_{33} 为正。

IV 区在内表面承受的塑料熔体压力作用下进行

弯曲变形和胀形变形, 而且其弯曲变形效应明显。由图 5 可见, IV 区两端已基本处于平面应变状态。IV 区变形过程中, 板料的 I 区与 IV 区的交界处已位于模腔侧壁。由于模具圆角半径对于 I 区的弯曲变形作用以及模具表面引起的摩擦力作用, 使 I 区材料难于进行塑性变形。这样便在 I 区与 IV 区的交界处形成板厚减薄较严重的塑性变形集中区。已与模底接触的 III 区, 在板厚方向上承受着塑料熔体压力和模腔表面约束与支撑作用, 而且由于模腔表面引起的摩擦力作用, 使得离 IV 区愈远处材料的塑性变形难度愈大。于是便在 III 区和 IV 区的交界处形成另一个板厚减薄较为严重的变形区。

A 区(即 II 区)最小厚度的模拟值为 0.725mm, B 区和 C 区构成区域(即 I 区与 III 区的交界处)最小厚度的模拟值为 0.801mm, D 区(即 III 区与 IV 区交界处)最小厚度的模拟值为 0.813mm。显然, 模拟值与 2.1 节实验测试值具有良好的相符性。

3 结论

1) 复合成形中铝板成形过程分为 3 个阶段: 合模锁紧铝板凸缘阶段; 注射塑料至塑料熔体压力上升到约 26MPa; 塑料熔体压力从约 26MPa 上升至成形结束。

2) 利用非平底凹模制备形状较复杂的铝板/塑料复合结构件的方法是可行的。成形铝板的实验测试厚度与有限元模拟值具有良好的相符性。这也表明利用弹塑性大变形 Lagrange 有限元法对于复合成形中铝板成形过程的模拟分析是可信的。

3) 板厚减薄严重的 A 区(即 II 区), 发生了胀形变形和剧烈的塑性剪切变形。I 区和 IV 区之间的大塑性变形区分为 B 区和 C 区两部分, B 区内绝对值最大的主塑性应变为负, C 区内绝对值最大的主塑性应变为正。III 区与 IV 区之间的 D 区绝对值最大的主塑性应变为负。

REFERENCES

- [1] Delmonte J. Metal/ Polymer Composites [M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 143 - 160.
- [2] Karlsson K F, Astron B T. Manufacturing and applications of structural sandwich components[J]. Composites A, 1997, 28(2): 97 - 111.
- [3] 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.
- [4] Gobessi M, Arnold W A. Stressed skin sandwich construction for the automotive industry[J]. SAE Trans, 1998, 107: 914 - 930.
- [5] Langerak N A, Kragtwijk S P. Lightweight car body design[J]. Automotive Engineering, 1998, 10: 106 - 110.
- [6] Buchholz K. Lightweight body panel materials[J]. Automotive Engineering, 1998, 12: 19 - 22.
- [7] 李成功, 傅恒志, 于 翹, 等. 航空航天材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 123 - 185.
- LI Cheng-gong, FU Heng-zhi, YU Qiao, et al. Materials for Aviation and Spaceflight[M]. Beijing: Defense Industry Press, 2002. 123 - 185.
- [8] CHEN Ming-an, ZHANG Xin-ming, LEI Qiu-ling, et al. Finite element analysis of forming of sheet metal blank in manufacturing metal/polymer macro composite components via injection moulding[J]. Int J Machine Tools & Manufacture, 2002, 42(3): 375 - 383.
- [9] Schmoekel 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.
- [10] Zhang S H. Developments in hydroforming[J]. J Mater Processing Tech, 1999, 91: 236 - 244.
- [11] Hein P, Vollertsen F. Hydroforming of sheet metal pairs[J]. J Mater Processing Tech, 1999, 87: 154 - 164.
- [12] 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.
- [13] 陈明安. 铝薄板/塑料复合成形机理的研究-铝薄板成形及其与聚丙烯的粘接界面特性[D]. 长沙: 中南大学, 2002.
- CHEN Ming-an. Hybrid Forming of Aluminum Sheet/Plastics: Forming Process and Characterization of Aluminum Sheet/Grafted Polypropylene Interface [D]. Changsha: Central South University, 2002.
- [14] 陈火红. Marc 有限元实例分析教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. 269 - 274.
- CHEN Huo-hong. Course on the Practical Examples of Marc Finite Element Analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2002. 269 - 274.

(编辑 陈爱华)