

聚碳酸酯板材多点热成形数值模拟与成形精度分析*

曹鋆汇¹ 付文智¹ 李明哲¹ 刘纯国¹ 苏世忠^{1,2} Pham D T²

(1. 吉林大学无模成形技术开发中心, 长春 130025; 2. 卡迪夫大学制造工程中心, 卡迪夫 CF23 3AA)

摘要: 提出了用于热塑性聚合物板材的柔性成形技术——多点热成形技术。根据高温单向拉伸试验数据确定了不同温度下聚碳酸酯(PC)板材的超弹性材料模型参数。运用有限元软件 Abaqus 对不同温度和不同成形压力下的 PC 板材多点热成形过程进行了数值模拟, 结果表明: 当成形温度与成形压力分别为 160℃ 和 10 kPa 时, 成形件平均形状误差最小。参照数值模拟结果进行了 PC 板材的多点热成形试验, 验证了数值模拟结果的准确性。测量并分析了成形件的成形精度, 结果表明: 成形件具有较高的成形精度, 可以满足工程应用需要。

关键词: 多点热成形 柔性成形 聚碳酸酯 数值模拟 成形精度

中图分类号: TQ320 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)01-0335-06

引言

聚碳酸酯(PC)是一种典型的热塑性非晶聚合物,具有良好的透明性、抗冲击性、耐热性以及尺寸稳定性,已广泛应用于航空、汽车、农业、建筑以及医疗等领域^[1-3]。PC 板材的加工成形属于聚合物制品的二次加工,最常用的加工方法为热成形^[4-7]。在热成形过程中,待成形的板材被加热到高弹态,在压力作用下与模具表面贴合,最终获得与模具形面相同的成形件。由于模具的设计与制造需要较长的周期以及较高的费用,因此传统热成形工艺只适用于大批量相同形面产品的制造。

多点热成形工艺基于多点成形^[8-10]的原理,使用多点模具代替传统热成形中的固定形面模具,利用多点模具能够快速改变模具形面的特点,多点热成形工艺可以实现小批量三维曲面产品的快速、低成本生产^[11-12]。本文以球面件和马鞍面件为例,对 PC 板材在不同工艺参数下的多点热成形过程进行数值模拟研究,分析成形温度和成形压力对成形质量的影响,确定 PC 板材多点热成形的最佳成形温度与成形压力。利用多点热成形试验机进行 PC 板材的多点热成形试验,使用超声波测厚仪测量成形件的厚度并与数值模拟结果进行对比,验证数值模拟结果的准确性。

1 成形原理与试验装置

多点热成形将多点模具技术与传统热成形工艺

相结合,利用多点模具的可重构性满足不同形面成形件的加工,成形过程可分为调形、加热、成形和冷却 4 个阶段,如图 1 所示。在调形阶段,利用调形系统根据目标形面计算并调整多点模具基本体冲头的高度,使多点模具形面与目标形面一致;在加热阶段,利用加热系统将 PC 板加热到其玻璃态转变温度之上使其软化,此时 PC 板处于高弹态^[13],具有良好的可加工性;在成形阶段,利用压缩空气在软化的板材上、下表面之间形成一定的压力差,板材在压力作用下与多点模具表面贴合;在冷却阶段,保持成形件上下表面之间的压力差,待成形件冷却固化后将其从多点模具上取下。

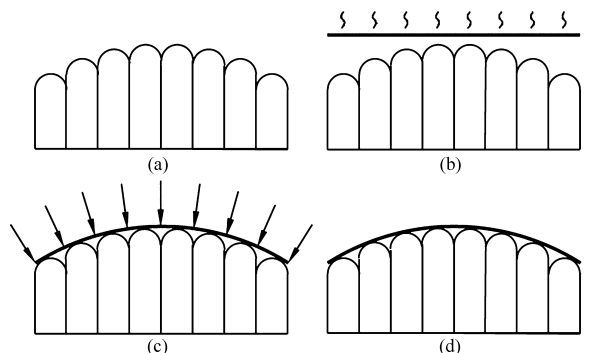


图 1 多点热成形过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of MPTF process

(a) 调形 (b) 加热 (c) 成形 (d) 冷却

图 2 所示为吉林大学无模成形技术开发中心研制的多点热成形试验装置,该装置主要由多点模具和加热箱组成,多点模具最大成形尺寸为 800 mm ×

1 200 mm,基本体冲头截面尺寸为 40 mm × 40 mm,球头半径为 30 mm;加热箱的温度可以通过温度控制系统进行调节,底部采用两层耐高温硅橡胶膜密封,PC 板料放置于两层硅橡胶膜之间加热。成形时,向加热箱中通入压缩空气,可以在板料上下表面形成压力差,板料在压力作用下变形,下层硅橡胶膜在成形过程中既可以起到保温的作用,又可以起到弹性垫的作用,避免成形件表面出现压痕。

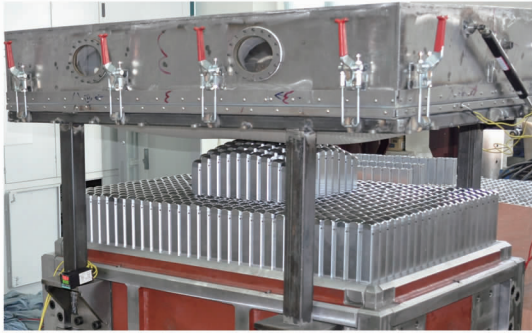


图2 多点热成形试验装置

Fig. 2 Experimental setup for MPTF

2 材料参数及有限元模型

当温度高于玻璃态转变温度时,PC 板料处于高弹态,可以视其为不可压缩的类橡胶材料,其变形行为可以采用超弹性材料模型^[14-16]来描述。本文选用 Mooney - Rivlin 模型^[17]描述 PC 板材在高弹态的力学行为,其应变能方程可以表示为

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (1)$$

式中 C_{10} 、 C_{01} ——与温度相关的材料性能参数

I_1 、 I_2 ——第一、第二应变张量不变量

C_{10} 、 C_{01} 的具体数值可通过对 PC 板材的高温单向拉伸试验数据进行拟合得到。

对于单向拉伸状态,Mooney - Rivlin 模型的应力-应变本构方程可以表达为

$$\sigma = C_{10} \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) + 2C_{01} \left(1 - \frac{1}{\lambda^3} \right) \quad (2)$$

式中 σ ——工程应力 λ ——拉伸率

图3为 PC 板在 150、160、170℃的单向拉伸试验数据与利用式(2)拟合得到的数据之间的对比,从图中可以看出,拟合曲线与试验曲线能够较好地吻合。

数值模拟所使用的软件为 Abaqus/Explicit 动态显式模块。PC 板材厚度为 4 mm,尺寸为 300 mm × 300 mm,采用四边形壳单元 S4R 来划分网格。加热箱上下两层硅橡胶膜厚度分别为 2 mm 和 5 mm,上层硅橡胶膜采用四边形壳单元 S4R 划分网格,下层硅橡胶膜采用实体单元 C3D8R 划分网格,厚度方向划分 5 层单元,成形压力均匀分布于上层硅橡胶膜

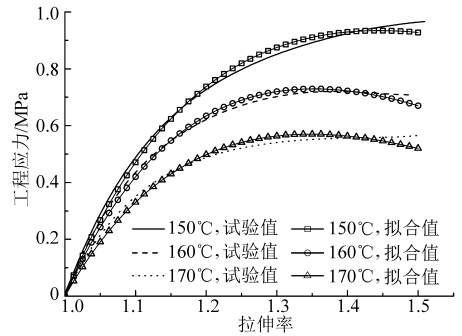


图3 Mooney - Rivlin 模型拟合数据与拉伸试验数据对比

Fig. 3 Comparison of stress-strain curves between Mooney - Rivlin model and experimental data

表面。为了简化模型,多点模具基本体只保留冲头球面,采用刚体壳单元 R3D4 离散。本文以球形面和鞍形面为例对多点热成形过程进行数值模拟,球形面半径为 500 mm,马鞍面的曲面方程为

$$f(x, y) = \sqrt{500^2 - x^2} - \sqrt{500^2 - y^2} \quad (3)$$

考虑到模型几何形状、载荷以及边界条件的对称性,为了节约计算时间,数值模拟时采用 1/4 模型,如图4所示。

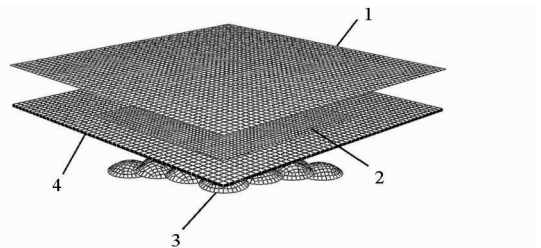


图4 PC 板多点热成形有限元模型

Fig. 4 FE model for MPTF of PC sheet

1. 上硅橡胶膜 2. PC 板材 3. 多点模具 4. 下硅橡胶膜

3 数值模拟与分析

成形温度与成形压力是多点热成形工艺中两项重要的工艺参数,本节将通过分析不同成形温度和成形压力下的数值模拟结果,确定 PC 板多点热成形的最佳工艺参数。

在成形压力为 8 kPa 的条件下,分别对成形温度为 150、160、170℃的多点热成形过程进行数值模拟,图5所示为不同成形温度下球面件沿标记线 OA 的轮廓形状。从图5中可以看出,在 8 kPa 的成形压力作用下,当成形温度为 150℃时,PC 板料的变形抗力较大,板料无法与多点模具表面贴合,随着成形温度的升高,PC 板料的变形抗力减小,成形件与目标形面之间的误差减小,当成形温度为 170℃时,PC 板料与多点模具形面完全贴合,成形件与目标形面基本一致。

在相同的成形温度下,取不同成形压力对多点

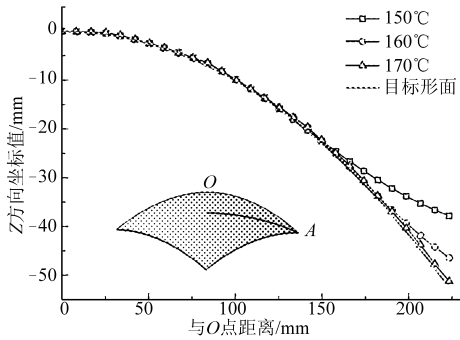


图 5 不同成形温度下球面件沿标记线 OA 的轮廓
Fig. 5 Profiles from the simulation results along line OA at different forming temperatures

热成形过程进行数值模拟,图 6 所示为成形温度 160℃ 时不同成形压力下球面件沿标记线 OA 的轮廓形状。当成形压力为 2 kPa 时,成形件轮廓与目标形状差距较大,成形件边缘部位没有与多点模具贴合,随着成形压力的增大,成形件轮廓逐渐接近目标形状,当成形压力为 10 kPa 时,成形件轮廓与目标形状基本一致。

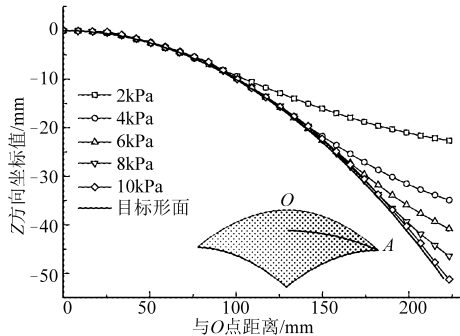


图 6 不同成形压力下球面件沿标记线 OA 的轮廓
Fig. 6 Profiles from the simulation results along line OA at different forming pressures

通过以上分析可以看出,成形温度过低或者成形压力过小都会造成 PC 板料在成形过程中无法与多点模具贴合,影响成形件的成形精度。为了确定 PC 板材多点热成形的最佳成形温度与成形压力,定义了成形件平均形状误差 Z_{RMS} ,其表达式为

$$Z_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i^2} \quad (4)$$

式中 n ——数值模拟结果中成形件的节点总数
 Z_i ——成形件第 i 个节点与目标面对应点之间的 Z 轴坐标差值

图 7 所示为不同成形温度下球面件和马鞍面件平均形状误差随成形压力的变化曲线。从图中可以看出,由于马鞍面件的形面较为复杂,在相同的成形条件下,马鞍面件的平均形状误差略大于球面件的平均形状误差,但两种形面成形件的平均形状误差随成形压力的变化趋势相同;在一定的成形温度下,

当成形压力较小时,两种形面成形件的平均误差值均较大,说明 PC 板料无法与多点模具贴合;随着成形压力的增大,成形件的平均形状误差减小,当成形压力增大到一个特定值时,成形件平均形状误差达到最小值,说明在当前成形压力下 PC 板料已经完全与多点模具贴合;随着成形压力的继续增加,成形件的平均形状误差逐渐增大,这是由于多点模具的基本体冲头之间存在一定的间隙,过大的成形压力使 PC 板料在多点模具的间隙区域产生了凹陷,进而导致成形件的平均形状误差增大。

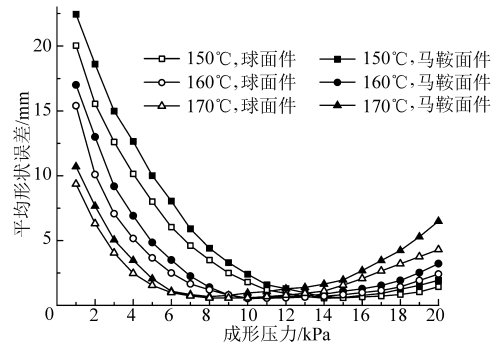


图 7 不同成形温度下成形压力对成形件平均形状误差的影响
Fig. 7 Effects of pressure on Z_{RMS} of formed parts at different temperatures

表 1 所示为不同成形温度下两种形面成形件的最小平均形状误差及达到最小平均形状误差时的成形压力。可以看出,当成形温度与成形压力分别为 160℃ 与 10 kPa 时,两种形面成形件的平均形状误差值均为最小值,说明该成形温度与成形压力为 PC 板材多点热成形的最佳工艺参数。

表 1 不同温度下成形件的最小平均形状误差及达到最小平均形状误差时的成形压力

Tab. 1 Minimum Z_{RMS} and forming pressures relate to the minimum Z_{RMS} at different forming temperatures and forming pressures

| 成形件形面 | 成形温度 /℃ | 最小平均形状误差/mm | 成形压力 /kPa |
|-------|---------|-------------|-----------|
| 球形面 | 150 | 0.556 | 15 |
| | 160 | 0.530 | 10 |
| | 170 | 0.568 | 8 |
| 马鞍面 | 150 | 0.612 | 15 |
| | 160 | 0.589 | 10 |
| | 170 | 0.661 | 8 |

4 成形试验与成形精度分析

为了验证 PC 板材多点热成形数值模拟的准确性并分析成形件的成形精度,利用图 2 中的多点热成形试验装置进行了 PC 板材多点热成形试验。参

照数值模拟结果,分别将成形温度与成形压力选定为 160°C 与 10 kPa , PC 板料毛坯尺寸为 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 4\text{ mm}$, 目标形面为半径 500 mm 的球面式和(3)所描述的马鞍面。图 8 所示为球面件和马鞍面件的多点热成形试验件照片,成形件表面光滑,无起皱、压痕等成形缺陷。

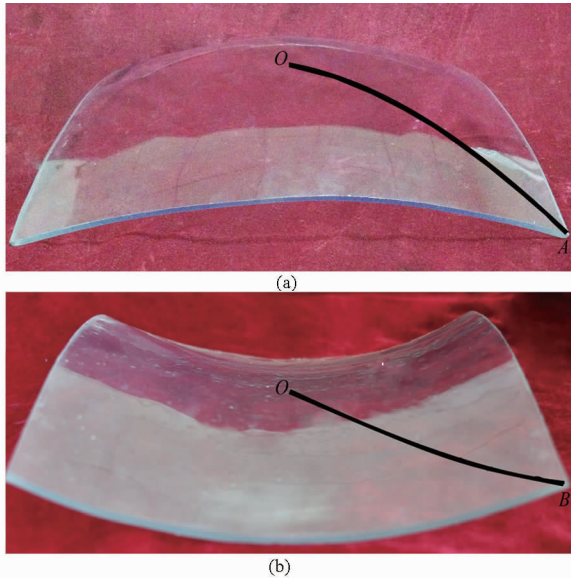


图 8 球面件和马鞍面件的多点热成形试验件照片

Fig. 8 Spherical and saddle-shape parts formed by MPTF

(a) 球面件 (b) 马鞍面件

使用超声波测厚仪沿标记线 OA 、 OB (见图 8) 测量了成形件的厚度并与数值模拟结果进行了对比,对比结果如图 9 所示。可以看出,球面件和马鞍面件中心区域的厚度分别为 3.81 mm 和 3.96 mm , 边缘区域厚度分别为 3.97 mm 和 3.83 mm , 球面和马鞍面试验件的厚度分布曲线与数值模拟结果趋势一致,数值基本吻合,说明本文所采用的材料参数和有限元模型正确。

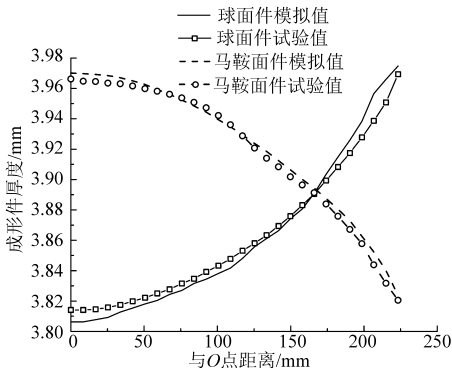


图 9 试验件与数值模拟结果的厚度分布对比

Fig. 9 Comparison of thickness distributions between experimental and numerical results

使用三维光学扫描仪对球面件和马鞍面件进行了测量,生成了包含成形件三维形状特征的点云数据,如图 10 所示。

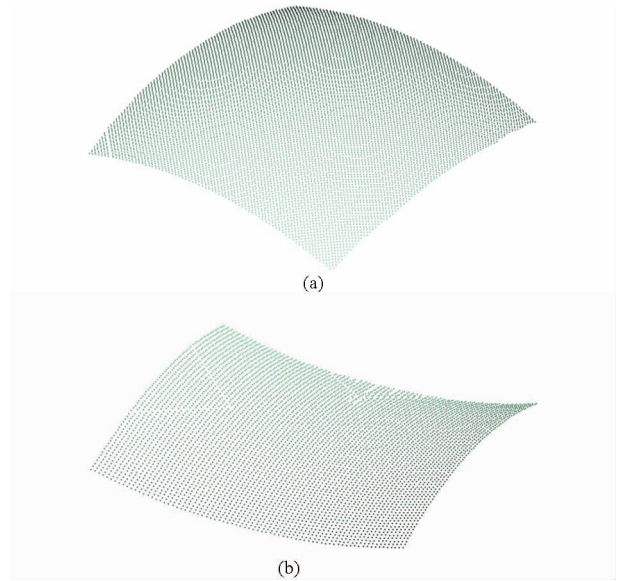


图 10 成形件三维扫描测量结果

Fig. 10 3D measured data of spherical and saddle-shape parts

(a) 球面件 (b) 马鞍面件

用过成形件中心点且平行于 Z 坐标轴的平面作为剖面将点云数据分割,计算了球面件在与 X 轴夹角为 α 的剖面线上的曲率半径,结果如图 11 所示。从图中可看出,成形件沿不同角度剖面的曲率半径均小于目标形面,最小曲率半径为 497.61 mm 。引起成形件曲率半径减小的主要原因是成形件的热收缩效应,为了减小热收缩对成形件精度的影响,在构建多点模具形面时可以适当增大目标形面的曲率半径。

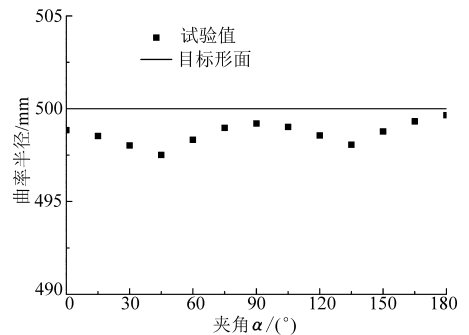


图 11 球面件沿不同角度剖面的曲率半径

Fig. 11 Radii of the spherical part on different section planes

将成形件点云数据与目标形面进行了对比,得到了球面件和马鞍面件的三维成形误差云图,如图 12 所示。由图可见,球面件的成形误差分布在 $-0.913 \sim 0.508\text{ mm}$ 之间,马鞍面件的成形误差分布在 $-0.463 \sim 0.998\text{ mm}$ 之间,马鞍面件的成形误差略大于球面件的成形误差,两种形面成形件的最大成形误差均出现在成形件的四角位置,成形件的总体成形精度较高,能够满足实际工程应用的要求。

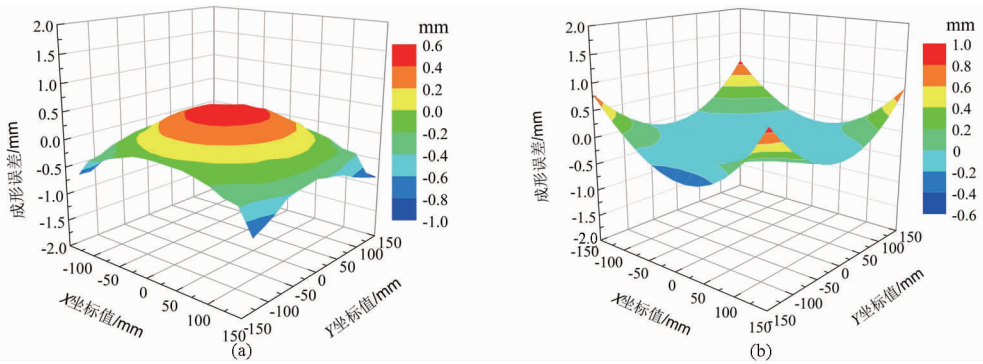


图 12 成形件三维成形误差分布图

Fig. 12 3D deviation distribution of spherical and saddle-shape parts

(a) 球面件 (b) 马鞍面件

5 结论

(1) 根据高温拉伸试验数据确定了 PC 板材在不同温度下的 Mooney - Rivlin 超弹性材料模型参数, 并建立了 PC 板材多点热成形有限元模型。对球面件和马鞍面件的多点热成形过程进行了数值模拟, 结果表明: 当成形温度与成形压力分别为 160°C 和 10 kPa 时, 成形件的平均形状误差最小。

(2) 参照数值模拟结果进行了 PC 板材多点热

成形试验, 成形件表面质量较好。测量了成形件的厚度并与数值模拟结果进行了对比, 试验结果与数值模拟结果基本吻合, 证明数值模拟结果可以为实际生产提供参考。

(3) 测量并分析了成形件的成形精度, 结果表明: 球面件的最大成形误差为 -0.913 mm , 马鞍面件的最大成形误差为 0.998 mm 。因此, 通过数值模拟确定合理的成形工艺参数, 多点热成形工艺可以成形出具有较高尺寸精度的成形件。

参 考 文 献

- Hou Zhenxiu, Wu Jing, Liu Zhi, et al. Effect of processing parameters on bulge-forming polycarbonate parts[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 14(1):54 ~ 58.
- 顾书英, 许乾慰, 张懿. 聚碳酸酯板的特性及其在建筑领域的应用[J]. 工程塑料应用, 2013, 14(1):105 ~ 108. Gu Shuying, Xu Qianwei, Zhang Yi. Characteristics of polycarbonate sheets and their applications in construction fields[J]. Engineering Plastics Application, 2013, 14(1): 105 ~ 108. (in Chinese)
- 侯珍秀, 刘恩仁, 刘智, 等. 热态气压胀形聚碳酸酯板材盆形件有限元分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(3):37 ~ 39, 70. Hou Zhenxiu, Liu Enren, Liu Zhi, et al. Finite element analysis of basin-shape parts in bulge-forming of polycarbonate sheet[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(3):37 ~ 39, 70. (in Chinese)
- Throne J L. Technology of thermoforming[M]. Cincinnati: Hanser Gardner Publications, 1996.
- 申长雨, 陈静波, 刘春太, 等. 塑料热成型技术[J]. 工程塑料应用, 2000, 28(1):37 ~ 41. Shen Changyu, Chen Jingbo, Liu Chuntai, et al. Thermoforming of plastics[J]. Engineering Plastics Application, 2000, 28(1): 37 ~ 41. (in Chinese)
- Penix J A. Thermoforming of plastic film and sheet[M] // Berins M L. SPI plastics engineering handbook of the Society of the Plastics Industry. New York: Springer, 1991: 383 ~ 427.
- Sala G, Di Landro L, Cassago D. A numerical and experimental approach to optimise sheet stamping technologies: polymers thermoforming[M]. Materials & Design, 2002, 23(1):21 ~ 39.
- Li M Z, Nakamura K, Watanabe S, et al. Study of the basic principles (1st report: research on multi-point forming for sheet metal) [C] // Proc. of the Japanese Spring Conference for Technology of Plasticity, 1992: 519 ~ 522. (in Japanese)
- Li M Z, Cai Z Y, Sui Z, et al. Multi-point forming technology for sheet metal[J]. Journal of Material Processing Technology, 2002, 129(1 ~ 3): 333 ~ 338.
- 陈雪, 李明哲, 付文智, 等. 多点成形冲头动态接触压力仿真分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10):223 ~ 226. Chen Xue, Li Mingzhe, Fu Wenzhi, et al. Simulation on dynamic contact forces of punches in multi-point forming process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10):223 ~ 226. (in Chinese)
- Su S Z, Li M Z, Liu C G, et al. Flexible tooling system using reconfigurable multi-point thermoforming technology for manufacturing freeform panels[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 504 ~ 506: 839 ~ 844.
- Cao Junhui, Fu Wenzhi, Li Mingzhe, et al. Research of polycarbonate sheet processing based on multi-point forming[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 161:77 ~ 81.
- 何平笙. 高聚物的力学性能[M]. 2版. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2008.
- Dong Y, Lin R J T, Bhattacharyya D. Determination of critical material parameters for numerical simulation of acrylic sheet forming[J]. Journal of Materials Science, 2005, 40(2):399 ~ 410.

- 15 Dong Y, Lin R J T, Bhattacharyya D. Finite element simulation on thermoforming acrylic sheets using dynamic explicit method [J]. *Polymers & Polymer Composites*, 2006, 14(3):307 ~ 328.
- 16 Azdast T, Doniavi A, Ahmadi S R, et al. Numerical and experimental analysis of wall thickness variation of a hemispherical PMMA sheet in thermoforming process [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 64(1 ~ 4): 113 ~ 122.
- 17 Mooney M. A theory of large elastic deformation[J]. *Journal of Applied Physics*, 1940, 11(9): 582 ~ 592.

Numerical Simulation and Accuracy Analysis of Multi-point Thermoforming of Polycarbonate Sheet

Cao Junhui¹ Fu Wenzhi¹ Li Mingzhe¹ Liu Chunguo¹ Su Shizhong^{1,2} Pham D T²

(1. Dieless Forming Technology Center, Jilin University, Changchun 130025, China

2. Manufacturing Engineering Centre, Cardiff University, Cardiff CF23 3AA, U. K.)

Abstract: A new flexible forming technique for thermoplastic polymer: multi-point thermoforming (MPTF) was developed. Polycarbonate (PC) is a typical thermoplastic polymer exhibiting many properties ideally. The material parameters of PC according to Mooney – Rivlin hyperelastic constitutive model were determined based on the high temperature tensile test data. The commercial software Abaqus was utilized to simulate the MPTF process of PC sheet. A series of numerical simulation results show that the best combination of forming temperature and forming pressure for PC sheet are 160°C and 10 kPa, respectively. MPTF experiments were carried out under the processing parameters which were determined by numerical simulations and the simulation results were validated by comparing them with the experimental results. The spherical and saddle-shape parts formed by MPTF were measured using a 3D sensing system and the measured data were compared with the target shape to analysis the accuracy of MPTF. The comparison results show that the formed parts have good accuracy.

Key words: Multi-point thermoforming Flexible forming Polycarbonate Numerical simulation Forming accuracy

(上接第 334 页)

Product Configuration Technology Based on Swarm Evolutionary Mechanism

Bao Zhiyan¹ Ji Shiming² Ruan Shufeng³

(1. Department of Mechanical and Electronic Engineering,

Zhejiang Water Conservancy and Hydropower College, Hangzhou 310018, China

2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China

3. Zhejiang Zhongqing Lifting Machinery Co., Ltd., Zhuji 311800, China)

Abstract: The characteristics of swarm evolutionary mechanism were analyzed, and a corresponding product configuration model was proposed. In order to select appropriate queen and male bees, a selection operator was established via similarity evaluation technique. A crossover operator was established to inherit useful components through components traversal, and a mutation operator was also established so as to configure individualized components based on the topological sort algorithm of constraint directed graph. The method of fitness evaluation was put forward by using estimated elements. The strategy and method were effective in an instance of the product called bridge crane.

Key words: Mass customization Individualized products Product configuration Swarm evolutionary Constraint directed graph