

# 分段铸造式飞机雷达罩成型模具的参数化设计\*

宋波<sup>1</sup>, 安鲁陵<sup>1</sup>, 郭保腾<sup>2</sup>, 鲍益东<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016;

2. 航空工业济南特种结构研究所, 济南 250023)

**[摘要]** 针对采用分段铸造式设计制造的复合材料飞机雷达罩的成型模具, 将参数化设计方法运用到其设计中, 能够提高设计效率、缩短设计周期。通过分析成型模具的结构特点和建模要求, 结合工装设计人员的经验, 确定其参数化设计流程。通过分析成型模具各段的具体结构, 提取成型模具各段的主要设计参数。基于 CATIA 开发出分段铸造式飞机雷达罩成型模具的参数化设计系统。

**关键词:** 分段铸造式; 复合材料; 雷达罩; 成型模具; 参数化设计; CATIA

## Parameterized Design About Forming Die of Aircraft Radome of Paragraphing and Casting Way

SONG Bo<sup>1</sup>, AN Luling<sup>1</sup>, GUO Baoteng<sup>2</sup>, BAO Yidong<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,

Nanjing 210016, China;

2. AVIC Research Institute for Special Structures of Aeronautical Composites, Jinan 250023, China)

**[ABSTRACT]** For forming die of composite material aircraft radome which is designed and manufactured by paragraphing and casting way, the parameterized design method is applied to its design, improving the design efficiency and shortening the design cycle. With the designing experience of tooling design workers, the parameterized design process is determined by analyzing forming die structure characteristics and modeling demands. The main designing parameters of every segment of forming die are extracted by analyzing its specific structure. Based on CATIA, the parameterized design system about forming die of aircraft radome of paragraphing and casting way is developed.

**Keywords:** Paragraphing and casting way; Composite material; Radome; Forming die; Parameterized design; CATIA

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.01/02.093

复合材料在飞机上的用量和应用部位已成为衡量飞机结构先进性的重要指标之一<sup>[1-2]</sup>。复合材料在飞机上的应用比例越来越高, 甚至在某些机型上超过了50%<sup>[3-4]</sup>。凭借相对密度小、热稳定性好、比强度高、比刚度、比模量高的特点, 复合材料可显著减轻飞机结构的重量, 在飞机上的应用部位也由次承力结构向主承力结构过渡<sup>[5-6]</sup>。

飞机雷达罩一般由低损耗复合材料组成的曲面壳体及附件构成, 主要对雷达天线起保护作用, 能够减少外部环境和人工操作对其影响<sup>[7]</sup>。复合材料飞机雷达罩构件的制造通常在成型模具中完成, 而模具对复合材料构件的成型质量和精度有很大影响, 因此对成型模具

的设计就尤为重要<sup>[8]</sup>。根据某研究所工装设计人员的反馈, 雷达罩成型模具的设计过程操作繁琐、重复设计较多、占用时间长。通常情况下, 飞机雷达罩的成型模具大而笨重, 为了便于设计制造, 根据其结构特点和建模要求, 对雷达罩的成型模具进行分段设计。结合工装设计人员的经验, 确定成型模具的参数化设计流程。通过分析成型模具各段的具体结构, 提取成型模具各段的主要设计参数。通过运用参数化设计方法, 将成型模具分段设计流程进行程序封装, 当工装设计人员输入具体的设计参数时, 可快速生成飞机雷达罩的成型模具, 能够突出参数化设计方法效率高、周期短的特点, 有效减少工装设计人员的重复劳动<sup>[9-11]</sup>。本文以分段铸造式飞机雷达罩成型模具的参数化设计为例, 介绍参数化设计方法在成型模具设计中的应用。

\* 基金项目: 航空科学基金项目(20161852018)。

## 1 成型模具的结构分析

飞机雷达罩成型模具的结构分为顶端阳模段、中间阳模段和底端阳模段,具体结构包括型面、法兰盘、加强筋、螺栓孔、螺杆和底座,如图1所示。对雷达罩成型模具的参数化设计建模时,需要考虑以下几点:(1)成型模具型面的外表面(以下简称外型面)是从雷达罩数模上提取而来,在使用前需要进行孔洞的检测、修补;(2)当成型模具某段的外型面无法偏移加厚时,需要工装设计人员对其进行手动处理,使其能够偏移;(3)成型模具底座的外形轮廓包括圆形和矩形两种类型;(4)加强筋周向均分,与成型模具型面近似垂直,且截面为近似等腰梯形;(5)成型模具各段之间通过法兰盘、定位销和螺栓连接,而螺栓孔需自动避开加强筋,并且预留扳手空间。

## 2 成型模具的参数化设计

针对分段铸造式飞机雷达罩成型模具,工装设计人员依赖所掌握的知识 and 经验,在设计成型模具时,有很大一部分精力用在了重复性设计上,导致设计效率低。为了提高设计效率、缩短设计周期,使工装设计人员将更多精力用在成型模具后期的仿真校核环节,接下来结合参数化设计技术,实现成型模具的参数化设计,其整体设计流程如图2所示。

在开始成型模具设计之前,需要工装设计人员从产品数模提取成型模具外型面。通常情况下,从数模上提取的外型面是不能直接使用的,需要检测是否有孔洞,进行修补后才能作为成型模具外型面使用。

### 2.1 顶端阳模段参数化设计

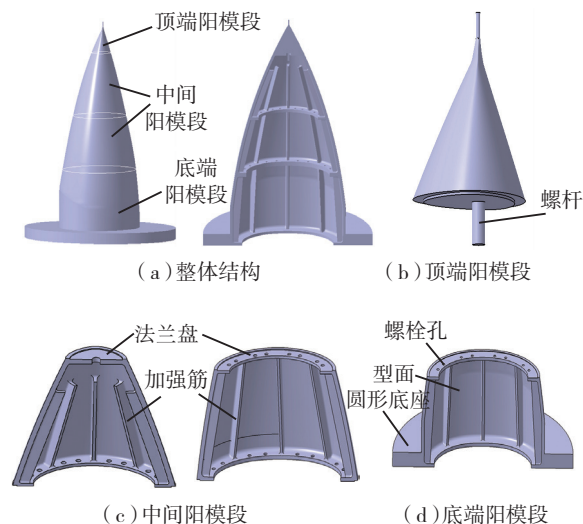


图1 成型模具结构

Fig.1 Structure of forming die

顶端阳模段创建所涉及的主要参数包括成型模具外型面,轴线,上、下分界平面,螺杆的直径和高度。其中上、下分界平面用来分割成型模具外型面,生成顶端阳模段外型面,轴线与螺杆的中心线重合,便于确定草绘轮廓圆的圆心,整个过程由参数化设计程序自动实现。

### 2.2 中间阳模段和底端阳模段参数化设计

中间阳模段和底端阳模段的参数化设计都包括型面,上、下法兰盘,加强筋和螺栓孔的设计。

#### 2.2.1 型面参数化设计

型面的创建所涉及的主要参数包括上、下分界平面和厚度。其中上、下分界平面用来分割成型模具外型面,生成中间阳模段或底端阳模段外型面,当外型面偏移出现问题时,需要工装设计人员对外型面进行手动修复,对局部曲率较大或者不连续的部分进行处理,保证修复后的外型面可以进行偏移,然后将偏移后的曲面与未修复之前的外型面封闭成实体,生成型面。

#### 2.2.2 上、下法兰盘参数化设计

法兰盘的创建所涉及的主要参数有厚度、宽度、与型面相交处的倒圆角半径,当上法兰盘的内腔是圆柱形时,需要输入半径。在设计底端阳模段时,模具底座与下法兰盘同时创建,当底座是圆形类型时,需要输入半径和高度;当底座是矩形类型时,需要输入长、宽和高。其设计流程如图3和图4所示。

#### 2.2.3 加强筋参数化设计

加强筋的设计要求是按周向均分,与型面近似垂直,截面近似为等腰梯形。加强筋分为两种类型:到上法兰盘下端面和不到上法兰盘下端面。其主要参数有根数、顶宽、底宽、高度、与型面和法兰盘相交处倒圆角半径,当类型为不到上法兰盘下端面时,还需要输入加强筋长度。其设计流程如图5所示。

创建加强筋的关键是加强筋轮廓线的确定,以到上法兰盘下端面的加强筋轮廓线的确定为例简要说明其实现方法。

- (1) 上、下分界平面分别与外型面相交产生交线;
- (2) 对其中一条交线拓扑,获取其上的一个点,作为参考点  $P_1$ ,通过该点确定另一条交线上对应的参考点  $P_2$ ;
- (3) 根据输入的加强筋根数  $n$ ,在两条交线上以  $i/n$  ( $0 < i < n+1$ ) 为比例生成对应的  $n$  对点;
- (4) 将这  $n$  对点连成直线,再对这些直线偏移、修剪产生加强筋的轮廓线;
- (5) 通过这  $n$  条轮廓线生成加强筋。

#### 2.2.4 螺栓孔参数化设计

螺栓孔的设计要求是自动避开加强筋,并且预留扳

手空间。其主要设计参数有孔数、孔径、孔中心到法兰盘内腔的边距。如果需要连接的相邻两段阳模之间加强筋数目成整数倍关系,那么任意相邻两个加强筋之间螺栓孔数相同;如果加强筋数目不成整数倍关系,那么任意相邻两个加强筋之间螺栓孔数不相同,但孔数差不会超过一个螺栓孔,其设计流程如图6所示。

创建螺栓孔的关键是孔如何分布,以中间阳模段下法兰盘和底端阳模段上法兰盘连接螺栓孔分布为例简要说明其实现方法。

(1)参数化设计程序获取中间阳模段加强筋数目 $n$ 、底端阳模段加强筋数目 $m$ 、螺栓孔数 $s$ ,根据实际设计经验,一般 $m \geq n$ 。

(2)当 $m$ 是 $n$ 整数倍时,如果 $s$ 是 $m$ 的整数倍,其商为 $t_1$ ,则底端阳模段的任意两个相邻加强筋之间有 $t_1$

个螺栓孔;如果 $s$ 不是 $m$ 的整数倍,其商为 $k_1$ ,余数为 $p_1$ ,则底端阳模段的任意两个相邻加强筋之间有 $(k_1+1)$ 或 $k_1$ 个螺栓孔,具体的螺栓孔数需要根据局部结构尺寸和扳手空间来确定。

(3)当 $m$ 不是 $n$ 整数倍时,如果 $s$ 是 $m$ 的整数倍,其商为 $t_2$ ,则底端阳模段的任意两个相邻加强筋之间有 $t_2$ 个螺栓孔。若底端阳模段的某两个相邻加强筋之间分布着中间阳模段的加强筋,则这 $t_2$ 个螺栓孔要避开中间阳模段的加强筋,同时预留扳手空间。如果 $s$ 不是 $m$ 的整数倍,其商为 $k_2$ ,余数为 $p_2$ ,则底端阳模段的任意两个相邻加强筋之间有 $(k_2+1)$ 或 $k_2$ 个螺栓孔,若底端阳模段的某两个相邻加强筋之间分布着中间阳模段的加强筋,则螺栓孔要避开中间阳模段的加强筋,同时预留扳手空间,具体的螺栓孔数需要根据局部结构尺寸和扳手

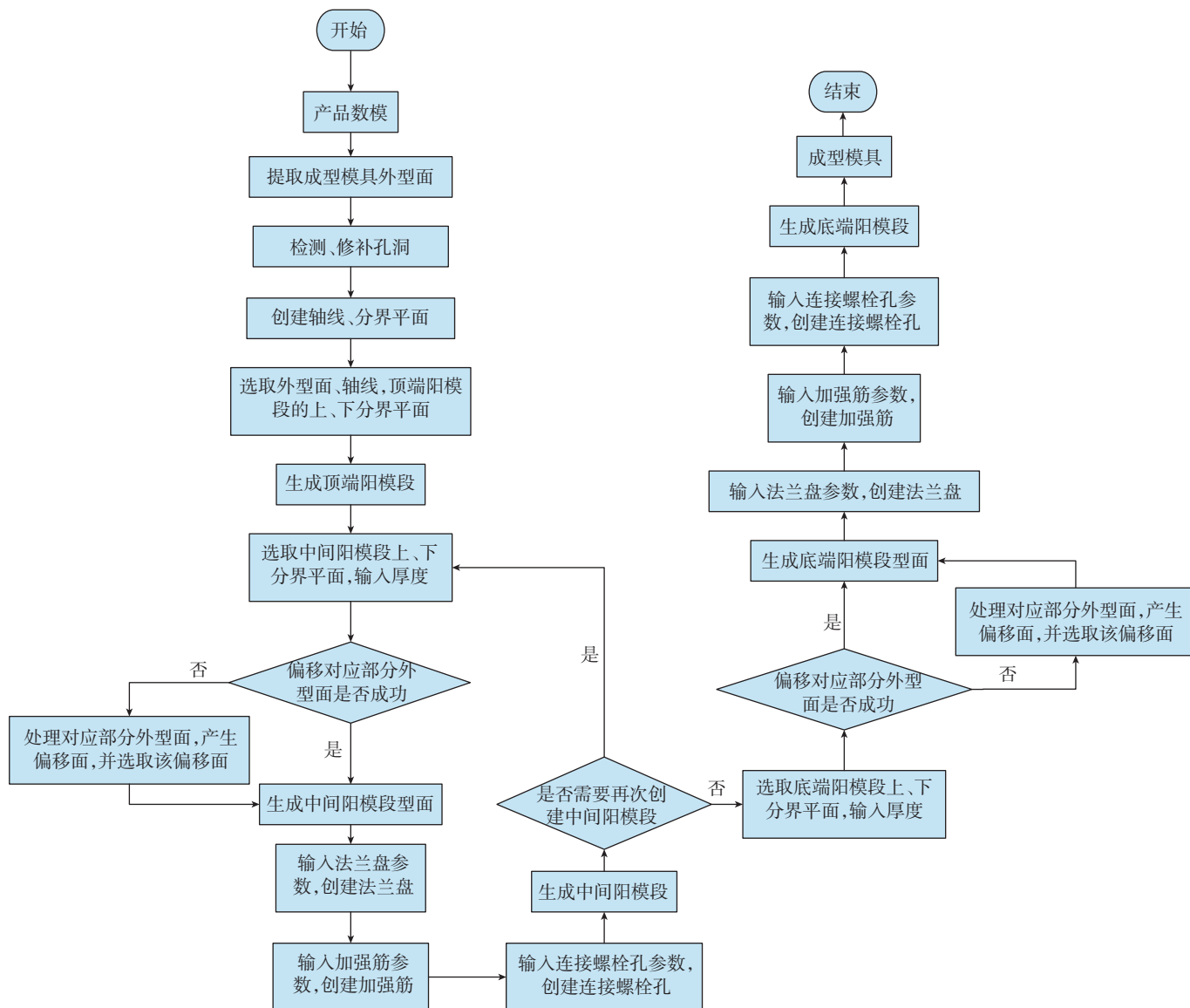


图2 成型模具设计流程图

Fig.2 Design flow chart of forming die

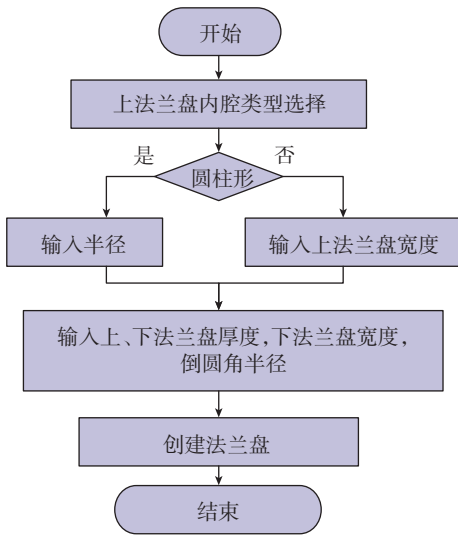


图3 中间阳模段法兰盘设计流程图

Fig.3 Design flow chart of flange of middle male die segment

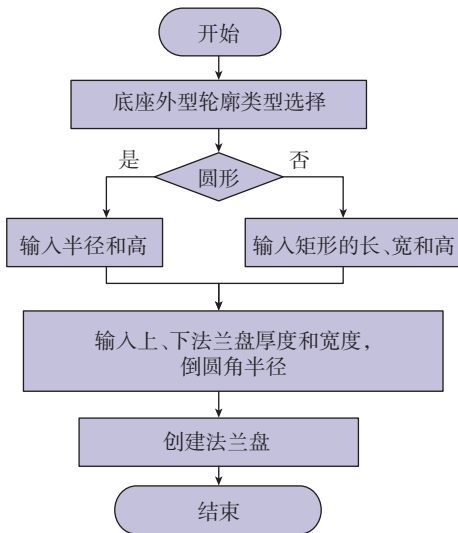


图4 底端阳模段法兰盘设计流程图

Fig.4 Design flow chart of flange of bottom male die segment

空间来确定。

### 3 设计实例

通过与某研究所合作项目中分段铸造式飞机雷达罩成型模具的设计为例,运用参数化设计方法,通过开发的参数化设计系统,输入相应的参数,得到雷达罩成型模具的设计结构,如图7所示。

### 4 结论

通过对分段铸造式飞机雷达罩成型模具的结构特点和建模要求的分析,结合工装设计人员的经验,将成型模具进行分段设计,提取各段的主要设计参数,实现了成型模具各段的参数化设计。针对加强筋的轮廓线和螺栓孔的分布,简要说明了其实现方法。通过对

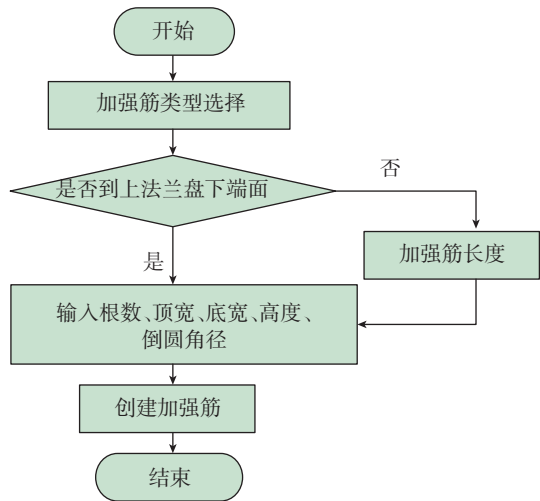


图5 加强筋设计流程图

Fig.5 Design flow chart of stiffener

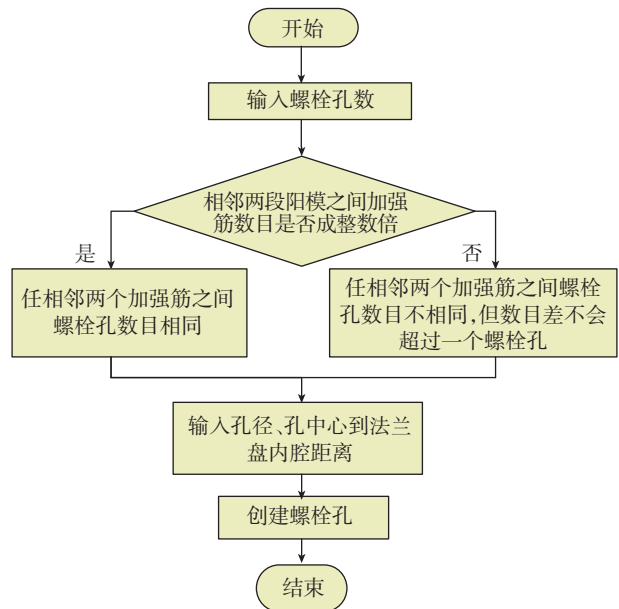


图6 螺栓孔设计流程图

Fig.6 Design flow chart of bolt hole

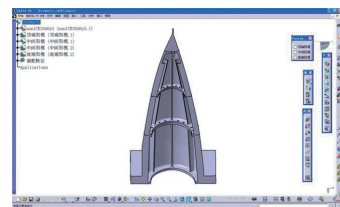


图7 某型号飞机雷达罩的成型模具设计实例

Fig.7 Example of forming die for a type aircraft radome

CATIA 进行二次开发,构建了分段铸造式飞机雷达罩成型模具的参数化设计系统,并集成到 CATIA 的装配设计环境中。目前该参数化设计系统已初步运用到某公司飞机雷达罩成型模具的设计上,大大提高了工装设计人员的设计效率、缩短了设计周期,验证了该参数化设计系统的可行性。

## 参考文献

- [1] 李明. 热塑性树脂基复合材料在民机上的应用研究[J]. 科技视界, 2016(26): 9-10.
- LI Ming. Application research of thermoplastic resin matrix composites in civil aircraft[J]. Science & Technology Vision, 2016(26): 9-10.
- [2] 孙振起, 吴安如. 先进复合材料在飞机结构中的应用[J]. 材料导报, 2015, 29(11): 61-64.
- SUN Zhenqi, WU Anru. Application of advanced composite in aircraft structures[J]. Materials Review, 2015, 29(11): 61-64.
- [3] 念波. 复合材料的未来[J]. 大飞机, 2015(4): 28-30.
- NIAN Bo. Future of composite materials[J]. Jetliner, 2015(4): 28-30.
- [4] 刘善国. 国外飞机先进复合材料技术[J]. 航空制造技术, 2014, 57(19): 26-31.
- LIU Shanguo. Advanced composite technology of foreign aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(19): 26-31.
- [5] 周少栋. 浅析复合材料在现代民航飞机上的应用[J]. 科技创新导报, 2015(14): 90-91.
- ZHOU Shaodong. Analyses application of composite materials in modern civil aviation aircraft[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2015(14): 90-91.
- [6] 吴晓春. 复合材料在民用航空飞机中的应用[J]. 科技资讯, 2014, 12(17): 89.
- WU Xiaochun. Application of composite materials in civil aviation aircraft[J]. Science & Technology Information, 2014, 12(17): 89.
- [7] 陈鲁峰, 王洪达, 王盼乐, 等. 飞机雷达罩复合材料产品数字化技术体系研究[J]. 科技创新导报, 2013(18): 6-7.
- CHEN Lufeng, WANG Hongda, WANG Panle, et al. Aircraft radome composite product digital technology system research[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2013(18): 6-7.
- [8] 晏冬秀, 刘卫平, 黄钢华, 等. 复合材料热压罐成型模具设计研究[J]. 航空制造技术, 2012, 55(7): 49-52.
- YAN Dongxiu, LIU Weiping, HUANG Ganghua, et al. Design study for composites autoclave forming mould[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(7): 49-52.
- [9] 田欢欢, 安鲁陵. 飞机复合材料构件成型模具型板架参数化设计[J]. 航空制造技术, 2015, 58(S1): 119-121.
- TIAN Huanhuan, AN Luling. Parametric design of mold plate rack for aircraft composites component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(S1): 119-121.
- [10] 查文陆, 安鲁陵, 王岩, 等. 复合材料成型模具的数字化设计技术[J]. 航空制造技术, 2015, 58(9): 57-60.
- ZHA Wenlu, AN Luling, WANG Yan, et al. Digital design technology for composites component mould and die[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(9): 57-60.
- [11] 张富官, 安鲁陵, 李汝鹏. 复合材料构件成型模具的参数化设计[J]. 宇航材料工艺, 2008, 38(6): 10-14.
- ZHANG Fuguan, AN Luling, LI Rupeng. Parameterized design of molding tool for composite component[J]. Aerospace Materials and Technology, 2008, 38(6): 10-14.
- [12] 李蔚, 高濂, 久米秀树, 等. 橡胶等静压成型纳米 ZrO<sub>2</sub>(3Y) 粉末坯[J]. 无机材料学报, 2002(6): 1297-1300.
- LI Wei, GAO Lian, KUME H, et al. Preparation of nano ZrO<sub>2</sub>(3Y) green compact by RIP[J]. Journal of Inorganic Materials, 2002(6): 1297-1300.
- [13] 黄建龙, 解广娟, 刘正伟. 基于 Mooney-Rivlin 和 Yeoh 模型的超弹性橡胶材料有限元分析[J]. 橡塑技术与装备, 2008(12): 22-26.
- HUANG Jianlong, XIE Guangjuan, LIU Zhengwei. Finite element analysis of super-elastic rubber materials based on the Mooney-Rivlin and Yeoh model[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipmen, 2008(12): 22-26.
- [14] 郑明军, 王文静, 陈政南, 等. 橡胶 Mooney-Rivlin 模型力学性能常数的确定[J]. 橡胶工业, 2003(8): 462-465.
- ZHENG Mingjun, WANG Wenjing, CHEN Zhengnan, et al. Determination for mechanical constants of rubber Mooney-Rivlin model[J]. China Rubber Industry, 2003(8): 462-465.
- [15] 燕山, 王伟. 橡胶类超弹性本构模型中材料参数的确定[J]. 橡胶工业, 2014(8): 453-457.
- YAN Shan, WANG Wei. Determination of material parameters for rubberlike hyperelastic constitutive models[J]. China Rubber Industry, 2014(8): 453-457.
- [16] JANKOWIAK T, RUSINEK A, LIST G, et al. Numerical analysis for optimizing the determination of dynamic friction coefficient[J]. Tribology International, 2016, 95(2): 86-94.
- [17] 赖亮庆, 黄艳华, 苏正涛, 等. 二苯醚亚苯基硅橡胶的性能研究[J]. 世界橡胶工业, 2014(6): 10-13.
- LAI Liangqing, HUANG Yanhua, SU Zhengtao, et al. Properties of diphenyl ether phenylene silicone rubber[J]. World Rubber Industry, 2014(6): 10-13.
- [18] 王国权, 刘萌, 姚艳春, 等. 不同本构模型对橡胶制品有限元法适应性研究[J]. 力学与实践, 2013(4): 40-47.
- WANG Guoquan, LIU Meng, YAO Yanchun, et al. Application of different constitutive models in the nonlinear finite element method for rubber parts[J]. Mechanics in Engineering, 2013 (4): 40-47.
- [19] MOONEY R. A theory of large elastic deformation[J]. Journal of Applied Physics, 1940, 11(9): 582-592.
- [20] HE L, MA Y, LIU Q T, et al. Surface modification of crumb rubber and its influence on the mechanical properties of rubber-cement concrete[J]. Construction & Building Materials, 2016, 120: 403-407.
- [21] 秘彤, 卢咏来, 王振华, 等. 等离子体氟化改性丁腈橡胶表面涂层的减摩机理研究[J]. 橡胶工业, 2013(9): 527-532.
- MI Tong, LU Yonglai, WANG Zhenhua, et al. Study on anti-friction mechanism of NBR modified by plasma surface fluorination[J]. China Rubber Industry, 2013(9): 527-532.
- [22] ABBASI F, MIRZADEH H, KATBAB A A. Modification of polysiloxane polymers for biomedical applications: a review[J]. Polymer International, 2001, 50(12): 1279-1287.
- [23] 李永清, 郑淑贞, 晏欣. 橡胶制品的防老化涂层[J]. 涂料工业, 2003(11): 45-48.
- LI Yongqing, ZHENG Shuzhen, YAN Xin. Anti aging coating for rubber products[J]. Paint & Coatings Industry, 2003(11): 45-48.

通讯作者: 安鲁陵, 博士、教授, 研究方向为数字化设计制造技术、虚拟制造技术、飞机装配技术, E-mail: anllme@nuaa.edu.cn.

(责编 逸飞)

(上接第87页)

[5] 李蔚, 高濂, 久米秀树, 等. 橡胶等静压成型纳米 ZrO<sub>2</sub>(3Y) 粉末坯[J]. 无机材料学报, 2002(6): 1297-1300.

LI Wei, GAO Lian, KUME H, et al. Preparation of nano ZrO<sub>2</sub>(3Y) green compact by RIP[J]. Journal of Inorganic Materials, 2002(6): 1297-1300.

[6] 黄建龙, 解广娟, 刘正伟. 基于 Mooney-Rivlin 和 Yeoh 模型的超弹性橡胶材料有限元分析[J]. 橡塑技术与装备, 2008(12): 22-26.

HUANG Jianlong, XIE Guangjuan, LIU Zhengwei. Finite element analysis of super-elastic rubber materials based on the Mooney-Rivlin and Yeoh model[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipmen, 2008(12): 22-26.

[7] 郑明军, 王文静, 陈政南, 等. 橡胶 Mooney-Rivlin 模型力学性能常数的确定[J]. 橡胶工业, 2003(8): 462-465.

ZHENG Mingjun, WANG Wenjing, CHEN Zhengnan, et al. Determination for mechanical constants of rubber Mooney-Rivlin model[J]. China Rubber Industry, 2003(8): 462-465.

[8] 燕山, 王伟. 橡胶类超弹性本构模型中材料参数的确定[J]. 橡胶工业, 2014(8): 453-457.

YAN Shan, WANG Wei. Determination of material parameters for rubberlike hyperelastic constitutive models[J]. China Rubber Industry, 2014(8): 453-457.

[9] JANKOWIAK T, RUSINEK A, LIST G, et al. Numerical analysis for optimizing the determination of dynamic friction coefficient[J]. Tribology International, 2016, 95(2): 86-94.

[10] 赖亮庆, 黄艳华, 苏正涛, 等. 二苯醚亚苯基硅橡胶的性能研究[J]. 世界橡胶工业, 2014(6): 10-13.

LAI Liangqing, HUANG Yanhua, SU Zhengtao, et al. Properties of diphenyl ether phenylene silicone rubber[J]. World Rubber Industry, 2014(6): 10-13.

[11] 王国权, 刘萌, 姚艳春, 等. 不同本构模型对橡胶制品有限元法适应性研究[J]. 力学与实践, 2013(4): 40-47.

WANG Guoquan, LIU Meng, YAO Yanchun, et al. Application of different constitutive models in the nonlinear finite element method for rubber parts[J]. Mechanics in Engineering, 2013 (4): 40-47.

[12] MOONEY R. A theory of large elastic deformation[J]. Journal of Applied Physics, 1940, 11(9): 582-592.

[13] HE L, MA Y, LIU Q T, et al. Surface modification of crumb rubber and its influence on the mechanical properties of rubber-cement concrete[J]. Construction & Building Materials, 2016, 120: 403-407.

[14] 秘彤, 卢咏来, 王振华, 等. 等离子体氟化改性丁腈橡胶表面涂层的减摩机理研究[J]. 橡胶工业, 2013(9): 527-532.

MI Tong, LU Yonglai, WANG Zhenhua, et al. Study on anti-friction mechanism of NBR modified by plasma surface fluorination[J]. China Rubber Industry, 2013(9): 527-532.

[15] ABBASI F, MIRZADEH H, KATBAB A A. Modification of polysiloxane polymers for biomedical applications: a review[J]. Polymer International, 2001, 50(12): 1279-1287.

[16] 李永清, 郑淑贞, 晏欣. 橡胶制品的防老化涂层[J]. 涂料工业, 2003(11): 45-48.

LI Yongqing, ZHENG Shuzhen, YAN Xin. Anti aging coating for rubber products[J]. Paint & Coatings Industry, 2003(11): 45-48.

通讯作者: 黄翔, 博士、教授、博士生导师, 研究方向为飞机数字化装配技术与装备、飞机制造质量控制等, E-mail: xhuangnuaa@163.com.

(责编 逸飞)