

热压罐温度场分析与影响因素研究

贾云超¹, 关志东¹, 李 星¹, 邵 严², 晏冬秀²

(1. 北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100191;
2. 上海飞机制造有限公司, 上海 200436)

[摘要] 热压罐固化成型是制造复合材料的常用方法, 固化期间工装表面不均匀的温度场分布会使材料产生残余应力, 从而影响材料的使用性能。翼梁采用复合材料热压罐工艺成型, 根据热压罐的工作原理, 建立了热压罐固化过程温度场模拟的有限元模型, 分析了工装表面温度场的分布特点, 给出了不同位置的温度曲线。研究了不同因素对工装表面温差的影响。计算结果表明, 提高罐内气流流速、增大升温速率、选用低比热容与高热导率的工装材料能够减小工装表面的温差, 有利于提高复合材料的成型质量。

关键词: 热压罐; 温度场; 复合材料; 工装

Analysis of Temperature Field Distribution and Study of Influence Factor in Autoclave Process

JIA Yunchao¹, GUAN Zhidong¹, LI Xing¹, SHAO Yan², YAN Dongxiu²

(1. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200436, China)

[ABSTRACT] Autoclave curing is a common method for manufacturing composite material, the uneven mould temperature distribution during the process can lead to residual stresses generated in composite and affect materials' performance. Based on the operating principle of autoclave process, a numerical model of composite autoclave curing process is proposed for the airplane spar. The model analyzes the characteristic of mould temperature distribution and gives the temperature curves on different locations. The influence of different factors on the mould temperature distribution are studied. The result shows that enhancing wind speed, increasing heating rate, using mould materials with low heat capacity and high thermal conductivity can reduce the temperature difference on the surface of the mould, help to improve the quality of composite.

Keywords: Autoclave; Temperature field; Composite; Mould

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.1/2.090

复合材料作为一种轻质高强的用于飞行器的理想材料, 具有诸多优点^[1]。在目前的常用制造工艺方法中, 热压罐工艺仍是生产大型复合材料构件的首选^[2], 工装表面的温度场分布是影响成型材料质量的重要因素。研究表明, 复合材料发生初始破坏的主要原因是在成型过程中由于温度场的不均匀性而产生的残余变形和残余应力^[3]。因此, 有必要对热压罐工艺固化中温度场的分布特点及其影响因素进行分析和研究。

在国内外的相关研究中, Loos 等^[4]针对环氧树脂基体的复合材料层合板, 推导了固化过程中的一维热化学模型, 并分析了固化度和温度场的状态。Kays 等^[5]针对厚截面的层合板, 建立了一维固化数值模型, 研究了影响成型过程温度场的截面几何形状等因素。Zhu 等^[6]通过理论模型研究了空间坐标、温度和固化度之间

的影响, 分析了固化度和温度在复合材料成型过程中的分布。Bogetti 等^[7]通过二维有限元方法, 对不同边界条件和任意截面形状的复合材料层合板的成型过程进行了数值模拟。左德峰等^[8]通过 OOP 技术和有限元分析的方法, 数值模拟了复合材料成型过程中的温度场分布。陈祥宝等^[9]从固化动力学角度入手, 结合热传导方程和固化反应动力学方程, 分析了复合材料固化过程的温度场分布。王永贵等^[10-11]对热压罐成型过程中框架式模具的传热方式、传热路径和传热空气的流态进行了研究, 分析了热压罐工艺的框架式模具温度场分布特点。张旭生等^[12]对 3 种不同风道进行了模拟仿真, 主要构型包括一字型、十字型和 T 型。

以上学者的工作更多的是在理论上进行分析和研究, 本文基于实际工程应用, 以真实飞机翼梁结构的热

压罐成型工艺为例,分析了热压罐成型中温度场的分布特点,并对其影响因素进行了研究。

1 问题描述

热压罐的工作原理如图 1 所示。

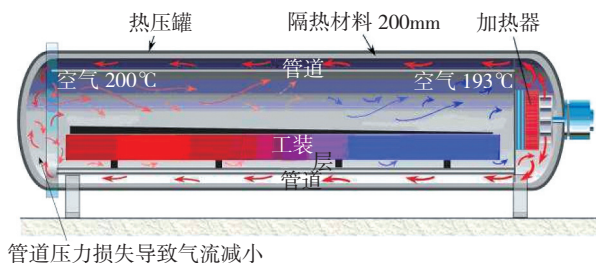


图1 热压罐工作原理

Fig.1 Operating principle of autoclave

热压罐的加热方式为电热阻丝加热,以空气(低温条件)或惰性气体(高温)为传热载体,气体循环的动力主要依靠罐内的风机,以此完成固化过程的循环加热,此外,还要通过循环水的冷却作用实现罐内的降温^[13]。

热量交换的传递方式可分为 3 种,即热对流、热辐射和热传导。热辐射现象主要发生在温度较高时,而热压罐内的温度一般不是很高,因此罐内热辐射影响较小。对于框架式工装,一般通过流动的罐内气体进行固体和流体间的热对流实现热量交换,同时,对于框架式工装本身,存在着热传导^[11]。

分析热压罐内的温度场,需要考虑以下 4 个问题:

(1) 热压罐内包括 2 个区域,分别为流体区域(空气)和固体区域(工装及翼梁构件),即温度场分析是一个流固耦合问题。

(2) 罐内存在 2 种热交换方式,分别为热对流(工装固体区域与罐内流体之间)和热传导(工装本身的固体区域),其中热对流主要依靠流固界面处的非流动层实现。

(3) 复合材料在固化过程中会出现放热现象,需考虑放热对工装温度场的影响。

(4) 根据罐内雷诺数判断,存在湍流现象,需使用湍流模型进行计算^[14]。

2 温度场模拟

2.1 数值模型

基于热压罐的工作原理,利用 CATIA 建立的热压罐的几何模型如图 2 所示,热压罐外壁为热气入口,内壁为加热工作段,热气流对工装及制件加热后从一端流出。图 3 给出了热压罐内梁工装及“C”形翼梁制件的模型以及利用 ICFM CFD 软件划分网格的结果。

利用 FLUENT 软件进行热压罐温度场的模拟。将

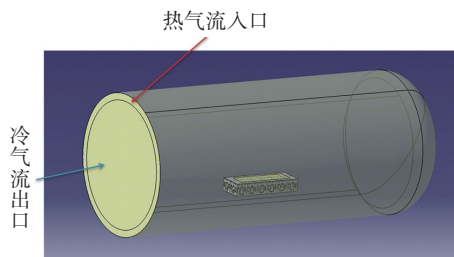


图2 热压罐CATIA几何模型

Fig.2 Geometric model of autoclave in CATIA

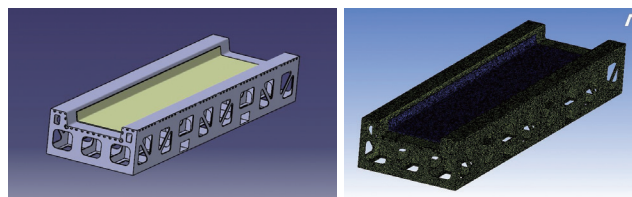


图3 翼梁工装与网格划分结果

Fig.3 Spar mould and meshing result

罐内空间划分为工装及制件部分的固体区域与气流通过的流体区域。进口边界条件为速度入口,设置气流流速 $v=4\text{m/s}$,由于工装相对整个热压罐的体积很小,可以认为出口处流动已经完全发展,选用出流方式为本模型的出口边界。模型的边界条件为:外壁设置为绝热壁,内壁以及工装的两面均存在计算网格,设置为耦合壁面。复合材料的固化放热可以通过设置热生成率来实现。罐内工作压力为 0.6MPa 。

热压罐的工艺曲线如图 4 所示,整个过程分为升温、保温、降温 3 个阶段,保温段初始的小凸台反映了热压罐实际工作过程中,从升温转变为保温时由于温度控制滞后所造成的短时罐温超过固化温度的情况。

由于工艺曲线的最高温度不超过 200°C ,可以认为材料属性均为常数,具体数值见表 1。

2.2 计算结果

计算得到梁工装固化过程中典型时间点的温度分布云图与相应时间点工装表面的最大温差如表 2 所示。

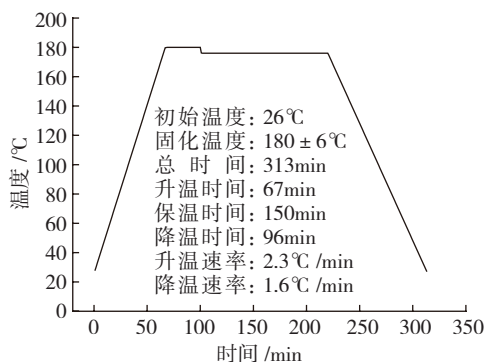


图4 热压罐工艺曲线

Fig.4 Process curve of autoclave

表1 材料属性参数

材料名称	密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	热导率 / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	比热容 / ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
空气	1.225	0.0242	1006
Q235	7800	65	700
复合材料	1520	0.4326	1260

表2 工装温度云图

时间点	温度云图 /K
升温结束 (67min) 最大温差 18.5℃	
保温 0.5h (97min) 最大温差 9.8℃	
保温 1h (127min) 最大温差 3.1℃	
保温结束 (217min) 最大温差 0.8℃	
降温 0.5h (247min) 最大温差 7.2℃	

为了更细致地了解工装表面的温度分布特点,在模型中设置了7个温度检测点(M1~M7),具体位置如图5所示。

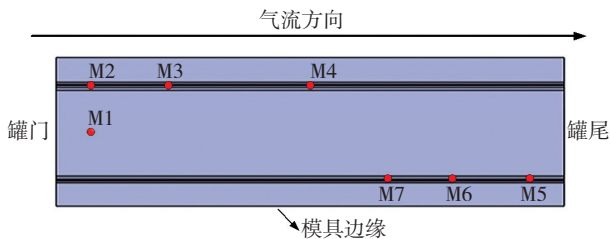


图5 工装表面温度监测点分布

Fig.5 Distribution of temperature monitoring points on the mould surface

模拟得到的各监测点的温度曲线如图6所示。

从温度曲线可以看出,由于复合材料的固化放热,工装表面的最大温度会略超过罐温。

图7给出了固化过程中工装表面的温差随时间的变化曲线。

由图6~7可知,在整个固化工艺过程中,工装表面最大温差为18.5℃,出现在升温结束时(67min)。由于热压罐采用循环气体作为加热载体,因此存在迎风面和背风面。对于升温阶段,迎风面温度较高,工装中部温度较低,温差逐渐增大。保温阶段温差减小。降温阶段迎风面温度较低,工装中部温度较高,温差呈增加的趋势。

2.3 计算结果与试验结果对比

针对该翼梁热压罐成型工艺还进行了相应的试验,

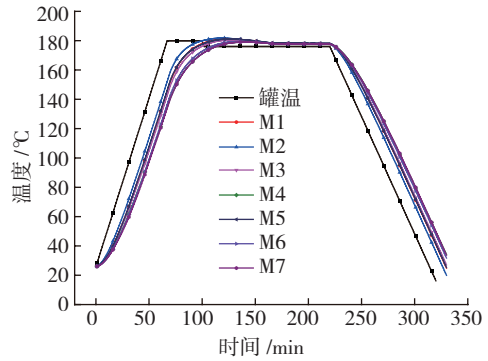


图6 各监测点温度曲线

Fig.6 Temperature curve of each monitoring point

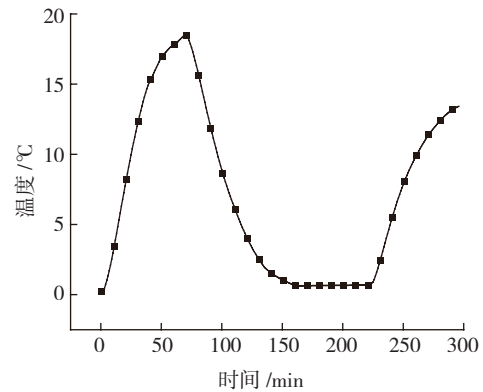


图7 表面温差随时间变化曲线

Fig.7 Curve of Surface temperature difference changing over time

热电偶位置与上文监测点位置相同。表3给出了各监测点计算温度与实测温度间的最大温差(计算温度 - 实测温度)。

表3 计算与试验结果对比

编号	最大温差 /℃	误差(相对固化温度) /%
M1	-5.6	-3.1
M2	-7.3	-4.1
M3	-8.2	-4.6
M4	-8.8	-4.9
M5	-9.8	-5.4
M6	-9.5	-5.3
M7	-7.8	-4.3

从表中可以看出,计算结果较实测结果偏低,但计算值与试验值的误差均在10%以内,验证了模型的有效性,说明模型可以较好地模拟热压罐内温度场的分布情况。

3 影响因素研究

复合材料在热压罐内的固化过程中,由于工装表面

温度分布不均匀所导致的温差对复合材料成型的质量有着决定性的影响^[15]。基于上节给出的模型,采用控制变量法,改变不同的研究变量,分别讨论气流流速、升温速率、工装材料对工装表面温差的影响。

3.1 气流流速影响

改变模型罐内的气流流速,其他参数与第2节模型相同,具体数值如表4所示。

表4 气流流速值

编号	气流流速 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
Model 1	3
Model 2	4
Model 3	5
Model 4	6

计算得到各气流流速下工装表面温差随时间的变化如图8所示,图9给出了梁工装表面最大温差随气流流速的变化。

由图8和图9可以看出,工装表面温差受罐内气流流速影响较大,温差随着流速的增大而减小。这是由于流速的增大改善了工装热对流交换的效果,提高了工装边缘的射流冲击热对流交换和工装表面的外掠平板热对流交换。当气流流速从 $v=3\text{m/s}$ 提高到 $v=4\text{m/s}$,表面温差降低 4.4°C ,下降幅度为19%,而当气流流速从 $v=5\text{m/s}$ 提高到 $v=6\text{m/s}$,表面温差降低 1.8°C ,下降幅度为11%,即温差的下降幅度越来越小。由此推测,当气流流速提高到一定值时,流速的影响将不再明显,故适当提高流速有利于提高复合材料的固化质量。

3.2 升温速率影响

改变热压罐工艺曲线的升温速率,其他参数与第2节模型相同,具体数值如表5所示。

不同升温速率的工艺曲线最终的固化温度相同,均为 180°C ,当温度达到固化温度时转为保温阶段,因此升温速率大的先进入保温段,计算得到不同升温速率工艺曲线的工装表面温差随时间的变化如图10所示,图11给出了工装表面最大温差随升温速率的变化。

由图10和图11可以看出,升温速率会显著的影响工装表面的温差,温差随着升温速率的增大而增大,且温差与升温速率成线性关系。较小的升温速率使工装与热气流间有充足的时间进行热交换与热传导,而较大的升温速率会导致工装不能充分换热,故适当降低升温速率有利于提高复合材料的固化质量,但这会增加复合材料固化成型的时间,需综合考虑加工效率等因素。

3.3 工装材料影响

采用不同的梁工装材料,本文分别选取了 Q235、

Invar 钢、45# 钢 3 种材料,其他参数与第2节模型相同,各材料物理属性如表6所示。

计算得到的不同材料工装表面温差随时间变化如图12所示。

不同材料工装表面的最大温差如表7所示。

从图12和表7可以看出,工装表面温差受工装材料的比热容和热导率的影响较大,比较 Q235 与 Invar 钢,由于 Invar 钢热导率很低,因此采用 Invar 钢的工装表面的温差更大;比较 Q235 与 45# 钢,虽然 45# 钢的热导率更小,但是其比热容也更低,在热导率与比热容的综合影响下,使得 Q235 与 45# 钢的温差曲线差异并不

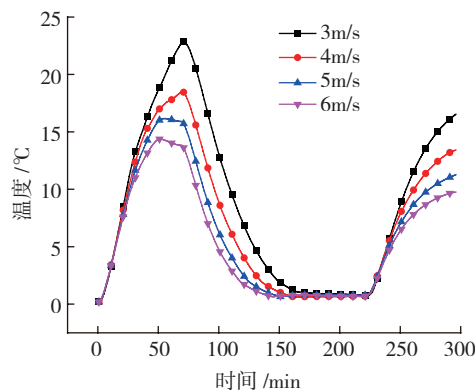


图8 不同气流流速下工装表面温差随时间变化

Fig.8 Surface temperature difference changing over time with different wind speed

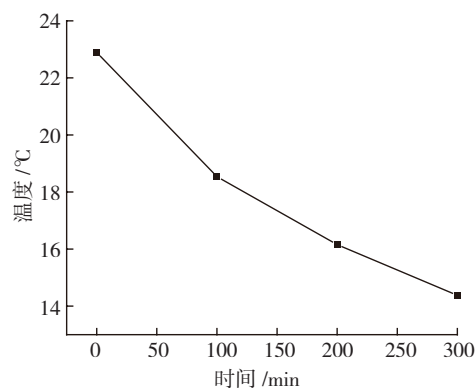


图9 最大温差随气流流速变化

Fig.9 Maximum temperature difference changing over wind speed

表5 升温速率值

编号	升温速率 / ($^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$)
Model 5	1.3
Model 6	1.8
Model 7	2.3
Model 8	2.8
Model 9	3.3

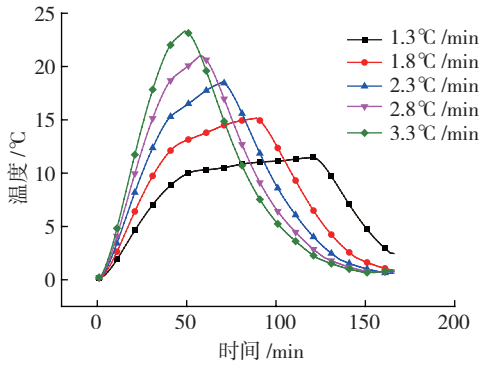


图10 不同升温速率下工装表面温差随时间变化
Fig.10 Surface temperature difference changing over time with different heating rate

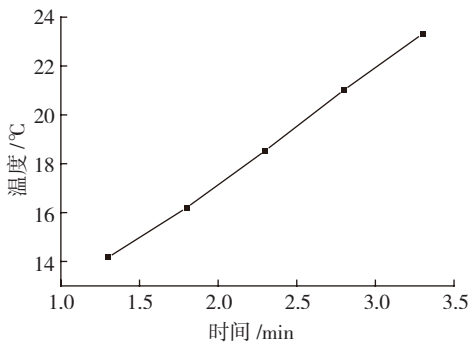


图11 最大温差随升温速率变化
Fig.11 Maximum temperature difference changing over heating rate

表6 材料属性参数

材料名称	密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	热导率 / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	比热容 / ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
Q235	7800	65	700
Invar 钢	8100	10.5	565
45# 钢	7810	50	465

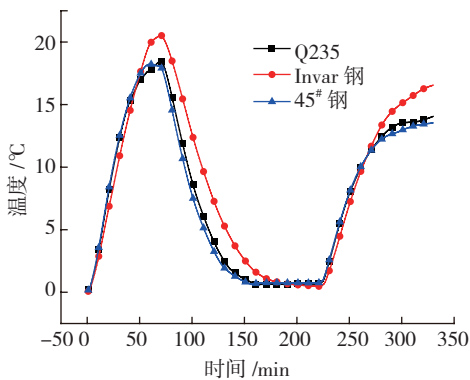


图12 不同工装材料工装表面温差随时间变化
Fig.12 Surface temperature difference changing over time with different mould materials

明显。选用比热容低,热导率高的材料有利于提高复合材料的固化质量,但同时需与材料的热变形等性质综合

表7 不同材料工装表面最大温差

材料名称	最大温差 / °C
Q235	18.5
Invar 钢	20.6
45# 钢	18.8

考虑。

4 结论

本文针对复合材料构件热压罐成型过程中温度不均匀、温度场变化复杂等问题,对复材构件热压罐成型温度场进行了模拟分析,并对其影响因素进行了研究,得到了以下结论:

(1)热压罐固化过程中,升温阶段迎风面温度高于背风面,工装中部温度最低;经过充分保温后,工装表面温差接近于零;降温阶段迎风面温度低于背风面,工装中部温度较高,温差逐渐增大。

(2)气流流速对工装表面温差有较大的影响。流速的增大改善了工装对流换热的效果,温差随着流速的增大而减小,但下降的幅度越来越小,适当提高流速有利于提高复合材料的固化质量。

(3)升温速率会显著的影响工装表面的温差。较小的升温速率使工装与热气流间有充足的时间进行热交换与热传导,温差随着升温速率的降低而减小,且温差与升温速率的变化基本成线性关系,但升温过慢则成本高效率低。需综合考虑材料质量与加工时间的要求。

(4)工装材料对工装表面温差有一定的影响,其中最重要的因素是热导率与比热容,具有低比热容,高热导率的材料有利于降低工装表面的温差,提高复合材料的成型质量。

参考文献

[1] 杜善义, 关志东. 我国大型客机先进复合材料应对策略思考[J]. 复合材料学报, 2008, 25(1):1-10.
DU S Y, GUAN Z D. Strategic for development of advanced composite technology for large commercial aircraft in China[J]. Acta Materialiae Composite Sinica, 2008, 25(1):1-10.

[2] 张铨, 梁宪珠, 王永贵, 等. 热压罐工艺环境对于先进复合材料框架式成型模具温度场的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2011, 29(4):547-553.
ZHANG C, LIANG X Z, WANG Y G, et al. Rules of impact of autoclave environment on frame mould temperature field of advanced composites[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2011, 29(4): 547-553.

[3] 寇哲君, 龙国荣, 万建平, 等. 热固性树脂基复合材料固化变形研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2006(S1):7-11.
KOU Z J, LONG G R, WAN J P, et al. Progress of study on curing

induced shape distortion for resin matrix thermosetting composites[J]. Aerospace Materials & Technology, 2006(S1):7-11.

[4] LOOS A C, SPRINGER G S. Curing of epoxy matrix composites[J]. Compos. Mater., 1983, 17:135-169.

[5] KAYS A O. Exploratory development on processing science of thick section composites, AFWAL-TR-85-4090 [R]. Wright Patterson: US Air Force Wright Aeronautical Laboratories, 1985.

[6] ZHU Q, PHILIPPE H G. Dimensional accuracy of thermoset composites: simulation of process-induced residual stress[J]. Journal of Composite Material, 2001, 35(24):2171-2205.

[7] BOGETTI T A, GILIESPIE J W. Two-dimensional cure simulation of thick thermoset composite laminate[J]. Compos. Mater., 1991, 25:239-273.

[8] 左德峰, 朱金福, 黄再兴. 树脂基复合材料固化过程中温度场的数值模拟 [J]. 南京航空航天大学学报, 1999, 31(6):701-705.

ZUO D F, ZHU J F, HUANG Z X. Numerical modeling of temperature field in curing process of thermosetting resin matrix composite materials[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1999, 31(6): 701-705.

[9] 陈祥宝, 邢丽英, 周正刚. 树脂基复合材料制造过程温度变化模拟研究 [J]. 航空材料学报, 2009, 29 (2):61-64.

CHEN X B, XING L Y, ZHOU Z G. Simulation and modeling of polymeric composite temperature change during manufacturing process[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2009, 29 (2):61-64.

[10] 王永贵, 梁宪珠, 曹正华. 热压罐工艺成型先进复合材料构件的温度场研究综述 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2009(4):70-76.

WANG Y G, LIANG X Z, CAO Z H. Review of the temperature field research of autoclave moulding for advanced composite components[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2009(4):70-76.

[11] 王永贵, 梁宪珠, 薛向晨, 等. 热压罐工艺的传热分析和框架式模具温度场分布 [J]. 航空制造技术, 2008(22):80-83.

WANG Y G, LIANG X Z, XUE X C, et al. Analysis of heat transfer and temperature field distribution on frame tooling in autoclave process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(22):80-83.

[12] 张旭生, 甘忠, 张海燕. 热压罐时效成形模具温度场优化研究 [J]. 中国制造业信息化, 2011, 40(19):30-32.

ZHANG X S, GAN Z, ZHANG H Y. Research on optimization of mold temperature fields in autoclave age forming[J]. Manufacture Information Engineering of China, 2011, 40(19):30-32.

[13] 于刚. 飞机复合材料构件热压罐成型温度场分析技术 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

YU G. A technology of temperature field analysis in autoclave processing for airplane composite structures[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.

[14] 张铖. 大型复合材料结构热压罐工艺温度场权衡设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.

ZHANG C. Curing temperature field tradeoff design method of large-scale composite material structure in autoclave process[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.

[15] 李桂东. 复合材料构件热压罐成型工装设计关键技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.

LI G D. Research on key technologies for tool design of composite components undergoing autoclave processing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (责编 李丹)

(上接第 89 页)

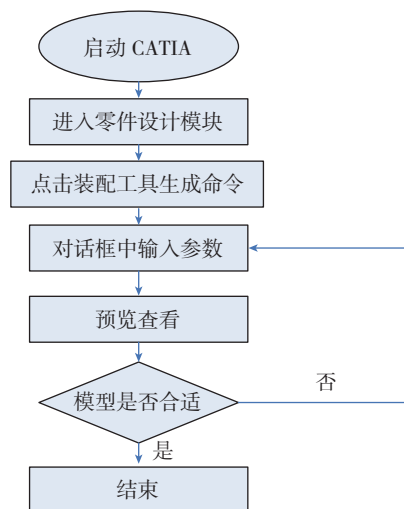


图8 操作流程

Fig.8 Operating procedures

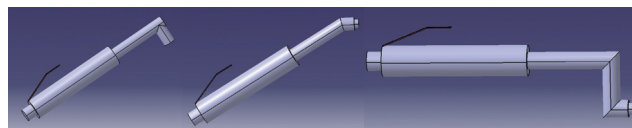


图9 某型号3种类型气钻零件模型

Fig.9 Three types of gas drilling part model of a model

CATIA 进行二次开发, 实现了某型号气钻的快速建模。由于是在后台通过程序完成模型的建立, 对于倒圆角等模型的修饰工作还需要一定的人工交互, 但是其建模速度相比利用目前的测量设备扫描出表示工具外形的一系列点, 然后通过处理点云做逆向工程建模速度更快、效率更高。相比传统的建模, 将装配工具的二维图以图片的形式显示到对话框中, 使参数更加容易理解, 建模过程直观可视化。在建模过程中, 将工程的一些规则融入到建模过程中, 扩展了 CATIA 智能检查功能, 这种方式易于将企业内部的建模规范、标准等知识显性表示在产品数模中, 实现企业知识与三维模型统一。将该建模思路加以扩展应用, 可以建立更多的装配工具数模, 从而建立装配工具模型库。

参考文献

[1] 陈田, 殷国富, 舒斌, 等. 参数化特征造型技术在水泵叶轮设计中的应用 [J]. 机械设计与研究, 2000 (2):24-26.

CHEN T, YIN G F, SHU B, et al. Parametric feature modeling technology in the pump impeller design[J]. Machine Design & Research, 2000(2):24-26.

[2] 张敏, 苏兰海, 王君英. 基于 CAA 的 CATIA 用户自定义特征创建 [J]. 机械设计与制造, 2008 (9):87-89.

ZHANG M, SU L H, WANG J Y. The creation of user defined geometric feature based on CAA/CATIA[J]. Machinery Design & Manufacture, 2008 (9):87-89. (责编 谷雨)