

# 基于 MBSE 方法进行民机设计的工具链建设

徐 州

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

**[摘要]** 随着民机系统的复杂度日益提升, 系统工程的思想越来越多地被应用到民机设计中, 而在系统工程中, 基于模型的系统工程(MBSE)方法是未来的发展方向。阐述了基于 MBSE 的民机设计理念及基本的设计流程, 介绍了对 MBSE 方法发展过程中具有重大影响意义的重要标准, 针对设计流程中的每个阶段列举了当今世界比较流行的软件并介绍了这些软件的功能, 最后提出了符合 MBSE 思想的工具链框架, 为 MBSE 方法在民机设计中的落地提供了参考。

**关键词:** MBSE; 民机设计; 设计流程; 工具链

## Tool Chain Construction of Civil Aircraft Design Based on MBSE Method

XU Zhou

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

**[ABSTRACT]** As the complexity of system rising day by day, the idea of system engineering is used in civil aircraft design more and more, and the model based system engineering (MBSE) is the trend. This article described the concept and process of civil aircraft design based on MBSE method and three important standards which bring a lot of benefit to MBSE during their development. Then it listed a few familiar software tools which are widely used in different stages of MBSE process. And it also proposed the tool chain architecture of MBSE which can provide a good reference for making MBSE practicable in civil aircraft design.

**Keywords:** MBSE; Civil aircraft design; Design process; Tool chain

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2017.05.100

民用飞机的创新设计能力与制造水平体现了国家的综合实力和科技水平, 是工业化国家竞相抢占的战略性新兴产业制高点。民用飞机不同于其他产品, 是一个极其复杂的系统, 需要满足极高的安全性和可靠性的要求; 飞机行业也不同于其他行业, 是一项高难度、高风险、高成本、长周期的工程。为了应对民机研制这种行业的特殊性和复杂性, 将系统工程思想应用到民机研制已经得到广泛认同, 而基于模型的系统工程(MBSE)是系统工程领域未来发展的趋势。

## 1 MBSE 简介

系统工程是一个职业、一个过程、一个观点, 是一种使系统成功实现的跨学科的方法和手段<sup>[1]</sup>。系统工程在发展的过程中, 大致经历了 4 个阶段: (1) 传统系统工程; (2) 流程结构化; (3) 工具信息化; (4) 知识模型化<sup>[2]</sup>。在当今的工程应用中, 系统工程已经发展到第 4 个阶段, 所谓的知识模型化, 就是将传统的系统工程信息传递方式由文件发展成模型, 也就形成了基于模型的

系统工程(MBSE), 它能为解决复杂系统工程问题提供方法论。

国外很早就开始 MBSE 的研究, 并把研究成果应用于实践。由于复杂系统更需要系统工程的应用, 所以航空、航天及汽车领域一直是系统工程发展的主要战场。美国航空航天局(NASA)开发了 MBSE 的基础架构, 并在实际的项目和工程中进行应用, 目前 JPL 实验室已经有 20 多个任务是把 MBSE 贯穿于任务始终的。在 MBSE 的发展过程中, Modelica 建模语言和 FMI (功能样机接口) 接口规范的发展使得多学科、多专业的仿真建模得以真正实现, 图 1 是 MBSE 发展的重大事件。

## 2 MBSE 中的几个重要标准

在 MBSE 的发展过程中, 有几个标准的产生和发展对 MBSE 的推动和成长起了重要的作用, 分别是 SysML 标准、Modelica 语言和 FMI 规范。

### 2.1 SysML 标准

为了支持 MBSE, 国际系统工程学会(INCOSE)和

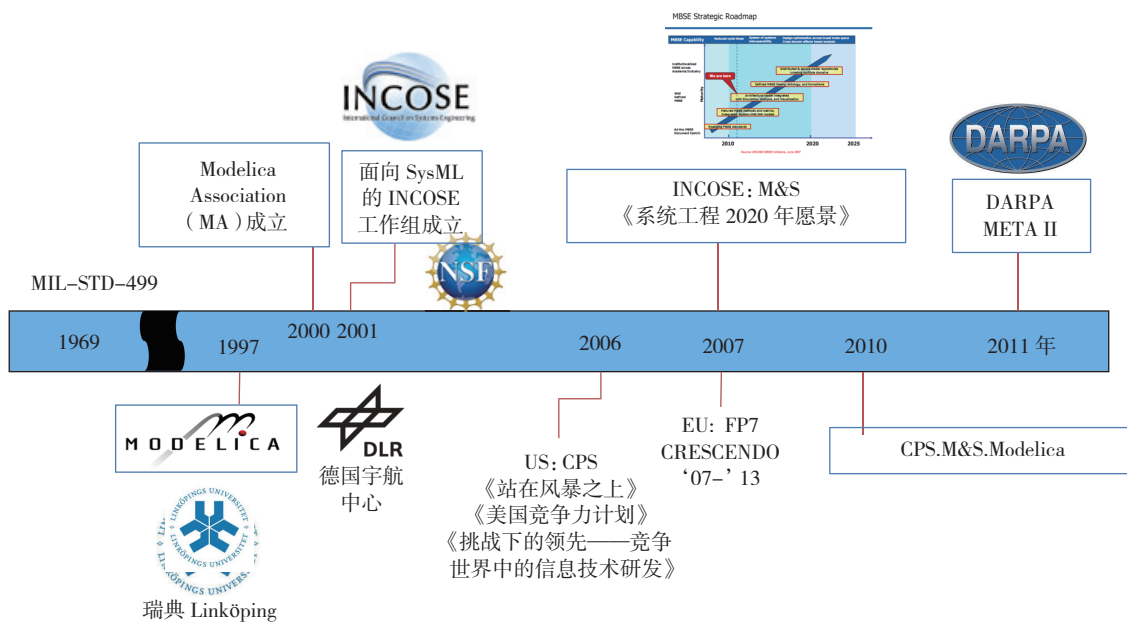


图1 MBSE的简要发展历史

Fig.1 Concise history of MBSE development

对象管理组织(OMG)在对UML2.0(统一建模语言)的子集进行重用和扩展的基础上联合提出一种通用的针对系统工程应用的“标准系统建模语言”SysML<sup>[3]</sup>。它是一种多用途的标准建模语言,能够支持系统工程应用的多领域系统包含硬件、软件、信息等系统的需求分析、系统设计、功能描述、系统验证等。

## 2.2 Modelica语言

Modelica建模语言由瑞典Linköping的非赢利组织Modelica协会开发,是一种适用于大规模复杂异构物理系统建模的面向对象语言,可以免费使用<sup>[4]</sup>。Modelica可以满足多领域建模需求,例如机电模型、机器人、汽车和航空应用中的机电系统,包含了机、电、液和控制、过程应用等<sup>[5]</sup>。

## 2.3 FMI规范

功能样机接口(Functional Mock-up Interface, FMI)规范,是一个开放的标准,由汽车OEM在欧洲发起的MODELISAR项目启动<sup>[6]</sup>,现已成为行业内主流标准。

## 3 基于MBSE的民机设计

在当代的民机设计过程中,系统工程的思想已经深入其中,它强调从飞机的顶层需求出发,通过对需求和功能的分析,进行架构设计,然后进行需求的分解、系统的架构设计。这样层层深入,一直到部件级。然后从部件级开始,实现不同层级的集成,以及进行对应层级的需求验证,最后直到飞机级。这也是常说的V模型。

基于MBSE的民机设计方法主要优势是能够在系统设计的早期阶段,即通过模型的建立能够清晰明确地

表达系统的功能,理清系统间的关系,完善复杂系统的需求,并通过前期模型的验证,确保需求的正确,保证高复杂度的系统能够被正确分解成为复杂度较低的系统 and 子系统,并通过这种层级的递进,来确保整个从上至下过程的严谨及准确,使高复杂度的系统研制能够成功;并且由于该方法能在飞机设计的早期阶段确保需求的正确性,可以减少项目后期的反复,能够大大节省项目的开支,控制项目的成本。基于MBSE的民机设计方法需要主制造商对系统工程思想在民机中的应用有深刻的理解,对建模仿真技术的应用也有一定的积累,并且已经有比较健全的体系支持该设计方法。

基于MBSE的民机设计流程如图2所示。可以看到,该流程除了有传统的V模型之外,还有所谓的小V循环,也就是在民机设计的前期,系统软硬件生产之前,通过建模仿真的方式对飞机的设备与系统进行虚拟集成和验证。

基于MBSE的民机设计方法与基于传统系统工程的设计方法的最主要区别是在系统设计的前端或者V模型的左侧。其概括起来可以表示为4个层级的建模仿真过程,分别是需求(R)、功能(F)、逻辑(L)和物理(P)。需求层主要指的是需求的捕获及管理,功能层是指对功能的分析及功能模型的建立,逻辑层指的是系统架构的设计,物理层则主要包括系统性能分析和三维物理建模。

## 4 MBSE常用工具

由于MBSE涉及到大量的不同层级的建模仿真工

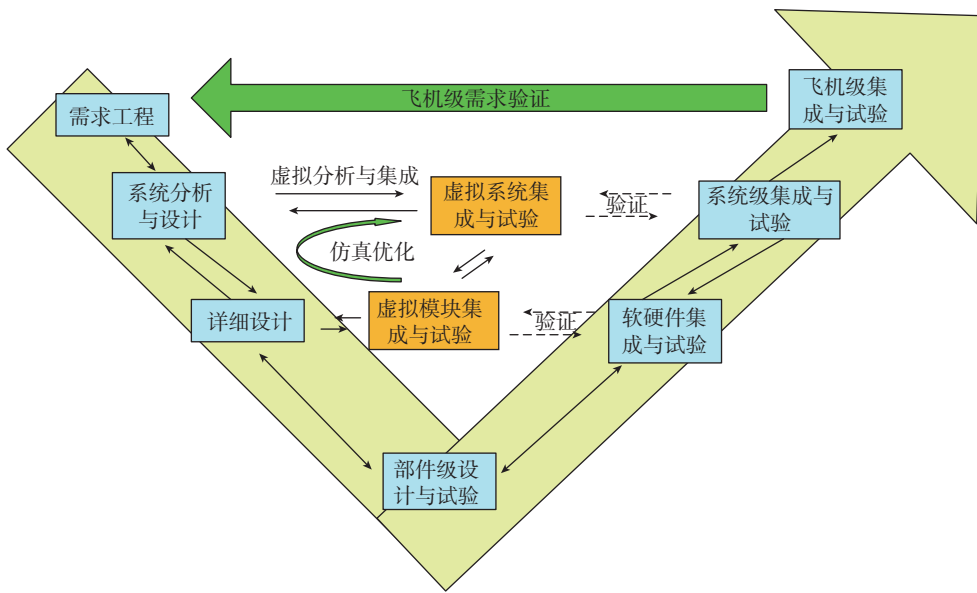


图2 基于MBSE的民机设计简化流程  
Fig.2 Concise process of civil aircraft design based on MBSE

作,需要用到很多不同的建模仿真工具,这里主要介绍一些常用的软件工具。

#### 4.1 需求管理工具

需求是民机设计中最先需要分析和定义的。需求相关的工作主要有:识别利益相关方、捕获利益相关方需求和需求管理。目前常用的需求管理软件是IBM公司的DOORS软件。

DOORS软件是全球领先的需求管理工具,是为捕捉、链接、追踪、分析并管理信息的变更以确保项目顺从特定需求和标准而设计的多平台系统。主要有以下比较显著的性能:(1)有相互协作的需求管理环境;(2)能管理需求更改;(3)能对需求进行很好的追踪;(4)可扩展性;(5)用于不同规模测试环境的测试追踪工具;(6)可以对需求进行签审等。正是由于这些显著的性能,DOORS已被全球超过20万用户采用,成为需求管理解决方案的标准。

#### 4.2 功能定义与分析工具

设计活动需要分析顶层及下层的需求,根据不同的场景,定义功能之间的关系,确定功能模型,并且能在一定程度上对需求进行确认和补充。用于功能定义与分析的软件主要有IBM公司的Rhapsody和EA(Enterprise Architect)软件等。

Rhapsody是业界领先的系统设计解决方案,可以满足生命周期中从需求捕获到系统开发的全过程需要。可以实现基于UML和SysML的模型驱动系统开发,并提供支持完整的C、C++、Ada和Java开发语言的主机和目标模拟环境,包括代码生成<sup>[7]</sup>。它主要有以下

特点:(1)面向功能分解的结构化建模方式;(2)支持UML2.0及更高版本的功能;(3)支持逆向工程的系统开发;(4)能生成可执行的模型;(5)模型与代码可关联;(6)自动生成文档等。

EA是一个基于UML的全功能的可视化编程工具,在用户界面模拟、影响分析、改善模型文档、加强项目管理等多个方面提供了强大的能力。主要功能包括:需求管理、项目管理、模型仿真、UML建模、SysML建模、应用程序执行与调试、双向代码工程、版本管理、BPMN建模、测试

点管理等,并且能够生成PDF格式、RTF格式和HTML格式的文档报告。

#### 4.3 逻辑定义工具

需求与功能确定之后,需要确定系统的架构、逻辑关系以及基本的分配布置等。目前逻辑层的常用软件有PaceLab、LMS Imagine.Lab等。

PaceLab是PACE公司开发的针对民机初期设计优化的一个软件。它有一个专门进行飞机系统架构设计以及权衡分析的模块,叫做SysArc。SysArc基于两个基本的组件,分别是PaceLab Suite和PaceLab APD。PaceLab Suite是一个基于知识工程的软件平台,具有很强的扩展性。PaceLab APD是基于Suite开发的一个专门针对飞机方案设计阶段的工具模块。SysArc是在APD的基础之上,针对飞机的功能子系统设计而专门开发的工具模块。它主要对各个功能子系统进行方案评估,包括:功能子系统模型库、盒段分区、自动布线、失效模式研究、电耗和热负荷研究。除了研究子系统本身的系统设计外,也可以研究子系统对整个飞机的影响,比如设备布置和布线方式对重量重心、飞行性能的影响。

LMS Imagine.Lab是一个综合性的软件<sup>[8]</sup>,能涵盖MBSE的多个层级的工作。在逻辑层的架构设计中,LMS Imagine.Lab有System Sythesis模块。System Sythesis模块的功能有:(1)系统架构设计;(2)系统模型配置;(3)仿真工况定义;(4)后处理;(5)优化。

#### 4.4 物理建模仿真工具

这里的物理建模仿真指的是与物理实体以及实体的性能相关的建模仿真,主要实现系统的性能和三维物

理的建模。在三维物理建模领域,用得最多的是 CATIA 软件,而在性能建模中,当前流行多学科的联合建模仿真,常用的诸如 Dymola、SimulationX 等。

CATIA 是三维物理建模领域当之无愧的领袖,在全球的航空航天企业中已经大规模的应用。很多企业得益于 CATIA 软件的应用,实现了飞机设计的无纸化,大大提高了效率。其功能十分强大,拥有众多的模块,提供产品的风格和外形设计、机械设计、设备与系统工程、管理数字样机、机械加工、分析和模拟等功能<sup>[9]</sup>。

在多学科联合建模领域,当前最流行的软件主要是基于 Modelica 语言,来实现机械、流体、电子电气、电磁、控制、传热等多个工程领域的联合仿真。另外 FMI 标准的提出,也为多学科建模工具与传统建模工具如 Simulink 等软件的链接提供了可能。在该领域, Dymola 和 SimulationX 是其中的佼佼者。Dymola 是法国 Dassault Systemes 公司的多学科系统建模仿真工具,广泛应用于汽车、航空、航天、能源等行业系统的功能验证和硬件在环仿真<sup>[10]</sup>,主要特点为:(1)开源;(2)无因果建模;(3)开放性;(4)符号运算。SimulationX 是一款是多学科领域建模、仿真和分析的通用工具,能分析评价技术系统内各部件的相互作用,并拥有强大标准元件库,这些元件库包括气动力学、热力学、电子学、三维多

体系统、一维力学、动力传动系统、液力学、磁学和控制。另外, SimulationX 还具有强大的后处理系统。

## 5 基于 MBSE 的民机设计工具链框架

针对 MBSE 的 RFLP 的建模仿真过程,最重要的是要打通各个层级之间的隔阂,使从顶层的需求到功能到架构最后到物理性能能够串联成一个相互追溯相,互影响的链条,最终实现全流程的建模仿真。这也是当今很多大型软件努力的目标,包括达索公司的 CATIA V6、西门子公司公司的 LMS Imagine.Lab 等都在宣称自己的软件有这种能力。但是由于单个公司的实力有限,目前单一软件实现 MBSE 全流程的设计还不太成熟。因此建议通过一个软件的工具链来完成该项工作(图 3)。

在图 3 中, DOORS 和 Rhapsody 同属于一家公司,软件之间的继承性和兼容性较强,而 PaceLab SysArc 专为飞机的架构而开发,内置了大量的系统和子系统的模型,能够较好地完成针对飞机的架构设计和权衡研究, Dymola 和 CATIA 同属于达索公司,在 Dymola 中能完美地调用 CATIA 模型,通过 FMI 接口标准,能够和 Simulink 等常用的传统建模软件交互。因此选择这些软件构建 MBSE 的一个工具链。当然,每个公司的环境和习惯不同,软件也各有自己的优缺点,没有统一的完美的方案。应该根据实际情况来配置使用相应层级的软件。

## 6 结束语

本文介绍了当今民机设计中的最先进的基于模型的系统工程设计理念,阐述了 MBSE 的概念和发展历程以及对 MBSE 产生重大推动作用的几个标准。随后根据基于 MBSE 的民机设计流程,介绍了流程中各个层级常用的建模仿真软件,最后根据这些软件的特性提出了 MBSE 的工具链框架。对于 MBSE 在民机设计中更好地落地提供了积极的参考意见。

## 参考文献

- [1] HASKINS C, FORSBERG K, KRUEGER M. Systems engineering handbook[M]. Santiago: INCOSE, 2007.
- [2] ESTEFAN J A. 基于模型的系统工程(MBSE)方法论综述[M]. 张新国,译.北京:机械工业出版社,2014.
- [3] ESTEFAN J A. Survey of model-based systems engineering(MBSE) methodologies[M]. ZHANG Xinguo, trans. Beijing: China Machine Press, 2014.
- [4] 蒋彩云,王维平,李群. SysML: 一种新的系统建模语言[J]. 系统仿真学报,2006, 18(6): 1483-1492.
- JIANG Caiyun, WANG Weiping, LI Qun. SysML: a new system modeling language[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(6): 1483-1492.
- [4] FRITZSON P. Principles of object-oriented modeling and simulation with modelica 2.1[M]. Wikipedia:Wiley-IEEE Press, 2004.

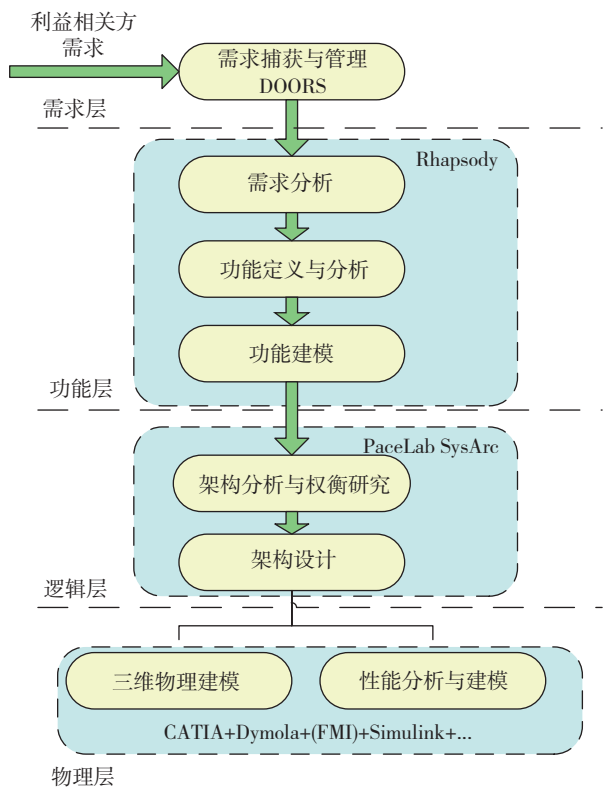


图3 基于MBSE的民机设计工具链框架

Fig.3 Tool chain construction of civil aircraft design based on MBSE

[5] 于涛,曾庆良.基于仿真建模语言 Modelica 的多领域仿真实现[J].山东科技大学学报,2005,24(4):13-16.

YU Tao, ZENG Qingliang. Multi-domain simulation based on modeling language modelica[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology, 2005, 24(4):13-16.

[6] MODELISAR. Functional mock-up interface for model exchange[J]. Information Technology for European Advancement, 2010, 26:17-23.

[7] 洪洋.用 Rhapsody 开发实时嵌入式系统[J].光电技术应用,2003,72(4):39-46.

HONG Yang. Design real-time system with rhapsody[J]. Electro-Optic Technology Application, 2003, 72(4):39-46.

[8] 李庆.飞机开发技术的全新突破——基于模型的系统工程[J].航空制造技术,2011(12):48-53.

LI Qing. Breakthrough on aircraft development technology: model-based systems engineering[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(12): 48-53.

[9] DASSAULT Systems. CATIA V5 knowledge advisor user's guide. Dassault Systems, 2000.

[10] 郭延风,陈关龙.基于 Dymola 的同步电机建模与仿真[J].机电工程,2004,21(3):40-44.

YUN Yanfeng, CHEN Guanlong. Modeling and simulation of synchronous machine using Dymola[J]. Mechanical and Electrical Engineering Magazine, 2004, 21(3):40-44.

通讯作者:徐州,硕士,工程师,研究方向为系统工程研究与应用、飞行控制系统试验, E-mail: yurenzhou2000@163.com.

(责编 大漠)

(上接第95页)

系列可观测序列,预测出脉动装配线运行状态以及诊断造成该状态的原因,依据诊断结果进行检修或优化,提前改进脉动装配线运行状态。

### 参考文献

[1] 范玉青.波音 787 飞机总装配线及其特点[J].航空制造技术,2011(23/24):38-42.

FAN Yuqing. Boeing 787 final assembly line and its characteristics[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(23/24): 38-42.

[2] 薛良昌.飞机总装脉动生产线及其信息管理系统的应用与研究[J].航空制造技术,2014(18):89-91.

XUE Liangchang. Application and research of pulsating aircraft assembly production line and its information management system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(18):89-91.

[3] 程卫民,冯长根,辛嵩.系统安全预测的本质与组合预测[J].中国安全科学学报,2001,11(4):73-76.

CHENG Weimin, FENG Changgen, XIN Song. Essence of system safety prediction and combined prediction[J]. China Safety Science Journal, 2001,11(4): 73-76.

[4] 孟银凤,李荣华.股票价格的马氏链预测模型[J].数学理论与应用,2010,30(3):53-57.

MENG Yinfeng, LI Ronghua. Stock price prediction model by Markov chain[J]. Mathematical Theory and Application, 2010, 30(3):53-57.

[5] 高惠璇.应用多元统计分析[M].北京:北京大学出版社,2005.

GAO Huixuan. Applied multivariate statistical analysis[M]. Beijing: Peking University Press, 2005.

[6] 何江宏,陈启明.基于 Markov 链的最优化预测模型及其推广应用研究[J].合肥学院学报(自然科学版),2006(3):11-13.

HE Jianghong, CHEN Qiming. A research on optimal forecasting model and its application based on Markov chain[J]. Journal of Hefei University (Natural Science), 2006(3):11-13.

通讯作者:秦亚茹,硕士,研究方向为航空宇航制造工程数字化制造技术, E-mail: qinyaru882@126.com.

(责编 大漠)

(上接第99页)

### 参考文献

[1] LIANG H Q, NAN Y, NING Y Q, et al. Correlation between strain-rate sensitivity and dynamic softening behavior during hot processing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015,632:478-485.

[2] NING Y Q, XIE B C, FU M W, et al. Microstructure and superplastic deformation for aerospace Ti-alloys associated with  $\alpha$ -phase curing behavior[J]. Aerospace Science and Technology, 2015,45:416-421.

[3] NAN Y, NING Y Q, LIANG H Q, et al. Work-hardening effect and strain-rate sensitivity behavior during hot deformation of Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe alloy[J]. Materials & Design, 2015, 2:84-90.

[4] LIANG H Q, GUO H Z, TAN K, et al. Correlation between grain size and flow stress during steady-state dynamic recrystallization[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015,638:357-362.

[5] QIN C, YAO Z K, LI Y Z, et al. Effect of hot working on microstructure and mechanical properties of TC11/Ti2AlNb dual-alloy joint welded by electron beam welding process[J]. Transactions Nonferrous Metals Society of China, 2014,24(11):3500-3508.

[6] TAN L J, YAO Z K, NING Y Q, et al. Effect of isothermal deformation on microstructure and properties of electron beam welded joint of Ti2AlNb/TC11[J]. Materials Science and Technology, 2011,27(9):1469-1474.

[7] 刘翠云,李焕喜,马朝利. TC18 钛合金耳片的断口形貌及疲劳性能[J].中国有色金属学报,2010,20(1):1050-1054.

LIU Cuiyun, LI Huanxi, MA Chaoli. Fractograph and fatigue behavior of TC18 titanium alloys lugs[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010,20(1):1050-1054.

[8] 吴根林,邓承佺,朱成香,等. TC4 钛合金飞机耳片锻件失效分析[J].热加工工艺,2016,45(1):251-253.

WU Genlin, DENG Chengyang, ZHU Chengxiang, et al. Failure analysis on TC4 Titanium ear forging for airplane[J]. Hot Working Technology, 2016,45(1):251-253.

[9] 董唯莉,朱海银,赵云. TC4 钛合金耳片断裂原因分析[J].失效分析与预防,2012,7(1):46-49.

DONG Weili, ZHU Haiyin, ZHAO Yun. Fracture analysis of TC4 titanium alloy ear plate[J]. Failure Analysis and Prevention, 2012,7(1):46-49.

[10] 解思适.飞机设计手册(第9册)[M].北京:航空工业出版社,2001:654-659.

XIE Sishi. Aircraft design manual (volume 9)[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001:654-659.

通讯作者:宁永权,西北工业大学副教授,从事钛合金方面相关研究, E-mail: ningke521@163.com.

(责编 大漠)