

文章编号:1674-8190(2021)06-134-08

飞机零组件材料选用和替代管理程序研究

李红蕊, 种煜

(中航西安飞机工业集团股份有限公司 西飞设计院, 西安 710089)

摘要: 材料选用和替代能够有效提升飞机零组件设计中材料应用技术和管理能力, 确保新研型号设计工作快速推进。本文对飞机零组件设计工作中材料应用现状进行分析, 指出目前设计人员在材料应用工作中存在的问题, 提出今后开展材料选用和替代工作应重点关注的技术内容以及应该遵循的工作流程; 并在此基础上归纳适用于飞机零组件设计的材料选用和替代工作的技术管理程序; 以某型军用飞机机体结构密封材料的选材实例和电气系统导电垫片的替代实例验证该程序的有效性。结果表明: 该材料选用和替代管理程序取得了预期效果, 材料替代管理程序的实施保证了生产现场状况的有序运行, 同时也为航空领域及其他领域内的相关企业提供参考借鉴。

关键词: 飞机; 零组件; 材料管控流程; 材料选用; 材料替代

中图分类号: V22

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.06.16

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Management Procedure of Material Selection and Substituting for Aircraft Parts

LI Hongrui, CHONG Yu

(Xi'an Aircraft Research Institute, AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an 710089, China)

Abstract: The material selection and substituting can effectively improve the ability of material application technology and management in aircraft parts designing, and ensure the rapid development for new aircraft design. By analyzing the current state of material application in aircraft parts designing, the application problems in designing are pointed out in this paper, and the concerned key technical and working procedure that ought to be followed by using the material selection and substituting are put forward. A technical management procedure about material selection and substituting applied to the aircraft parts designing is concluded. The examples of material selection for sealing materials of a certain military aircraft structure and the material substitution for conductive gasket in the electrical system are used to verify the effectiveness of this procedure. The results show that the material selection and substituting management procedure has achieved the expected effect, and can ensure the orderly operation in production field conditions, and provides the relevant reference for related enterprises in the aviation field and others.

Key words: aircraft; parts; material management procedure; material selection; material substituting

收稿日期: 2020-12-08; 修回日期: 2021-04-11

通信作者: 李红蕊, 504845904@qq.com

引用格式: 李红蕊, 种煜. 飞机零组件材料选用和替代管理程序研究[J]. 航空工程进展, 2021, 12(6): 134-141.

LI Hongrui, CHONG Yu. Research on management procedure of material selection and substituting for aircraft parts[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(6): 134-141. (in Chinese)

0 引言

材料选用和替代是飞机零部件设计工作中的重要技术基础内容之一^[1-2]。材料选用技术贯穿于整个设计阶段,用于指导设计人员解决飞机零部件设计过程中哪些材料可选和如何选取材料的问题,是确保材料设计工作有效开展的基础^[3-5]。材料替代技术主要出现在生产阶段,用于解决零部件生产过程中哪些材料可等效替代和如何替代的问题,是技术人员处理代料问题必须掌握的知识技能^[6-7]。开展这两项技术工作研究对于零部件设计中材料应用技术和管理能力的有效提升至关重要。

长期以来,设计人员在开展飞机零部件设计工作时对于材料的选择主要参考旧图样,多数情况下都是直接照搬旧图样中选用的材料,对于材料本身的特性和用途缺乏足够认识和考虑,行业内虽已有不少供设计人员直接使用的技术资料,但却缺乏有效的材料选用和替代技术管理体系,导致设计人员日常工作中除了采取“沿用”或者继续“仿制”的对策以外,基本没有其他更有效的技术手段。近年来随着新研型号的不断推进,此种对策已经极大地限制了设计水平的提高和新研型号技术水平的发展,并成为制约航空产品向设计能力进一步提升的主要短板之一。因此,为了有效提升零部件设计中材料应用技术和管理能力,现急需对材料信息标准化及材料管理架构进行研究,通过建立统一的材料选用和替代技术管理程序,运用先进的质量管理方法,不断优化材料选用和材料替代工作,确保新研型号设计工作快速推进。

近年来,国内外学者在不同领域的材料管理、选用和替代方面,已进行了大量的研究^[8-17]。国外M. F. Ashby等^[8]对机械设计领域的材料选择程序进行了研究,开发并实现了一种新型“四步走”的材料选择程序,即分析材料需求—筛选出候选材料—对候选材料进行排序—确定最佳材料,并展望了此方法在机械设计领域的应用。国内,王一龙^[10]提出对飞机产品建立专门的航空材料以及材料标准并实行单独管理,对于航空制造行业的健康可持续发展意义重大;蓝元沛等^[12]提出,科学、合理选材的实施需要科学的选材方法来实现,工程领域选材方法的制定对于设计人员正确选材至

关重要;材料替代方面,王程成^[15]对航空材料“严格落实代用料质量控制”问题进行了深入探讨,提出详细代料原则和规定的制定,对于保证装机材料的质量极为重要;张日洪^[16]提出,替代料的管理对于制造业控制材料采购成本、制造成本、订单及时交付、控制原材料库存资金流动等方面意义重大,只有建立替代料管理程序才能从根本上解决企业内部难题。

综合上述研究来看,国内外虽已有不少研究者对不同领域的材料管理、选用和替代程序进行了研究,但大多仅论述了企业内现有材料管理制度的滞后性以及材料管控程序的建立对于各领域内技术工作的重要性,针对实际设计生产使用的材料技术管理程序并没有提出具体有效的解决方案。

本文从对飞机零部件设计中材料应用现状的分析入手,制定一套切实可行的适用于飞机零部件设计的材料选用和替代技术管理程序,并以某型机机体结构密封材料的选材为例,验证程序的有效性。

1 材料选用和替代技术

材料选用工作贯穿于整个设计阶段,从设计人员提出所需材料的选用需求开始,历经概念设计、初步设计及详细设计三个阶段,到最终形成产品规范^[18]。材料替代工作则主要出现在飞机试飞与批生产阶段,由零件生产部门在生产急需或设计图样中所选材料不可得时提出。对于静强度、疲劳强度等试验机或试验件,原则上不办理代料,如因某些特殊原因确需办理代料的,应使用性能相同或性能稍低的材料进行替代。为了做好材料选用和替代工作,首先从了解设计阶段的材料选用需求以及生产阶段的材料替代需求入手,必须按顺序解决好以下三方面的技术问题,研究思路如图1所示。

(1) 解决流程问题:建立统一的材料管控流程。

(2) 解决哪些材料可选和如何选取应用问题:制定材料优选目录,建立材料选用管理程序。

(3) 解决哪些材料可互相等效替代和如何替代问题:制定材料等效替代目录,建立材料替代管理程序。

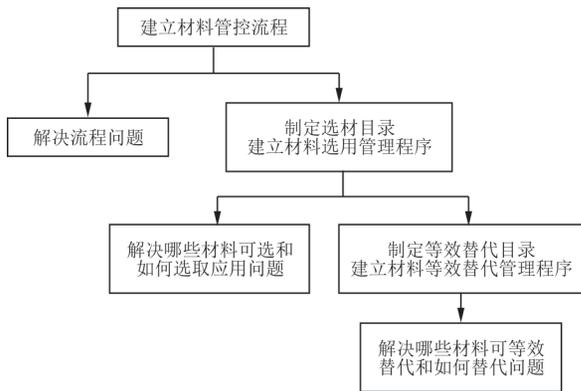


图1 研究思路

Fig. 1 The perspectives of the research

1.1 建立材料管控流程

由于飞机产品所用到的材料品种和材料标准数量巨大,零组件设计中材料牌号、状态、规格、材料标准的选择以及图样材料信息标注甚至材料的术语、定义、数据等都需要设计人员达成共识。如果对飞机设计中所用的材料以及材料标准缺少必要的管理,飞机所用材料及材料标准必然处于无序化状态,飞机研制和生产进度必然受到很大程度的制约^[19]。因此,在飞机产品设计源头建立一套统一的材料管控流程,对型号的顺利研制以及持续发展意义重大。

众所周知,材料技术人员是材料管控体系制度的制定者,零件设计人员是材料管控体系制度的执行者。要建立完整可行的材料管控体系,首先应从捕获材料选用的需求开始。那么如何捕获材料的选用需求,从而确保零件设计人员得到正确合理的材料信息,或许只能让材料技术人员与零件设计人员从技术层面实现有效对接,除此可能别无他法。根据多年来在飞机上的材料设计应用经验,可以采用的实施方案如图2所示。

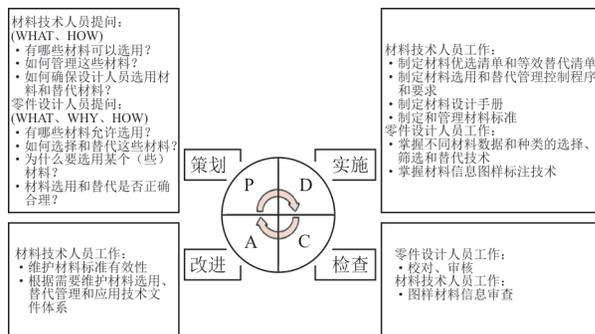


图2 实施方案

Fig. 2 The process of the implementation

从图2可以看出:策划(P)和实施(D)阶段是确保零件设计人员得到正确合理材料信息的关键所在。只有回答了P、D阶段材料技术人员与零件设计人员的“WHAT、WHY、HOW”三个问题,即“哪些材料允许选用、为什么要选用某个(些)材料、如何选择和替代材料”,才能制定出符合零件设计人员使用需求的材料优选清单、材料等效替代清单以及材料选用替代管理控制程序文件。同时,为了保证文件体系的先进性与适用性,还应在后续的检查(C)和改进(A)阶段中,随时根据设计及生产需要对材料选用、替代管理和应用技术文件体系进行审查和改进,只有这样,这套材料管控体系才算具备了相应的设计应用技术基础。

根据对众多材料及其标准、规格、应用特点的分析、总结和归纳,同时借鉴国外相关公司某些技术的设计应用经验,完整的材料管控流程如图3所示,其中所有工作都以确保设计人员正确选材为目标。

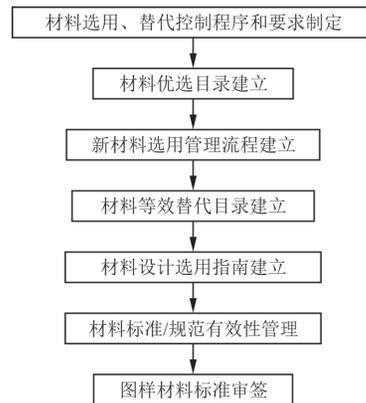


图3 材料管控流程

Fig. 3 The procedure of material management

(1) 制定材料选用/替代控制程序和要求

在开展飞机主产品材料选用及替代工作之前,零组件设计人员必须首先了解材料选用和替代技术的工作流程,并严格按照该流程来进行选材。这项技术内容的制定一般由材料技术人员依据多年来飞机设计中有关材料的应用经验来完成,具体内容将在2.2和2.3中展开阐述。

(2) 建立材料优选目录和材料等效替代目录

在制定了材料选用/替代控制程序和要求的基础上,还需参考国内航空用材料的生产和供应现状,并结合行业内目前在材料的采购、加工工艺以及实际库存等方面的实际情况,制定材料优选目录和材料等效替代目录,以规范飞机设计中材

料的选用/替代要求和范围,为零组件设计人员提供材料选用/替代方面的技术支持。

(3) 建立新材料选用管理流程

对于首次在飞机型号中拟选用的新研和新选材料,还需建立新材料管理流程进行管控。应按下述步骤鉴定合格后才可将其转为正常原材料管理:设计人员提出新材料选用需求;技术人员制定新材料技术规范;组织实施新选材料技术鉴定;采购新材料并进行入厂验收;合格后纳入材料优选目录,转为正常原材料管理。

(4) 建立材料设计选用指南

除上述要求外,还需制定设计选用指南。选用指南是规定产品设计过程中应遵循的技术准则、方法和基本要求的一类知识手册,对于缺乏经验的年轻设计人员来说,通过材料设计选用指南,能很快掌握这项基础技术的设计应用,从而优化设计过程中“认识—实践—再认识”的摸索过程,自主设计能力肯定会大幅提高。

(5) 对材料标准/规范的有效性进行管理

对生产部门而言,近年来供货渠道多变,材料标准来源众多并且内容差别较大,因此需要对飞机设计图样及文件中用到的材料标准/规范的有效性进行规范管理,如建立材料现行标准目录,规定这些材料标准的现行版次信息以及在实际生产中的使用要求,以避免造成生产现场材料使用混乱、零件返修、报废等问题。

(6) 图样的材料标准审签

对于所有的设计图样和文件,如果其中标注有材料标识,则这些设计图样和文件在其正式发放前,都应该提交材料主管单位进行材料标准化审查,审签人员应对图样中选用的材料是否满足各类文件要求以及所选材料的材料标识是否正确完整进行审核并签署,并且所给处理意见应满足相关文件的规定。

1.2 制定材料选用管理程序

解决了流程问题之后,下一步需要解决哪些材料可选和如何选取应用的问题。长期以来,飞机持续走仿制的运行模式使得设计阶段中材料及材料标准选用管理的重要性没有凸现出来,以至于设计工作中缺乏大批相对完善和实用的材料及材料标准选用管理技术文件。因此在开展飞机材料的设计工作之初优先制定材料选用管理程序,对于材料管控体系的建立和飞机产品向设计能力

的提升显得尤为重要。经过对当前设计工作中的选材程序进行总结和分析,同时参考相关领域内的先进技术标准^[20],材料选用管理程序流程如图4所示。

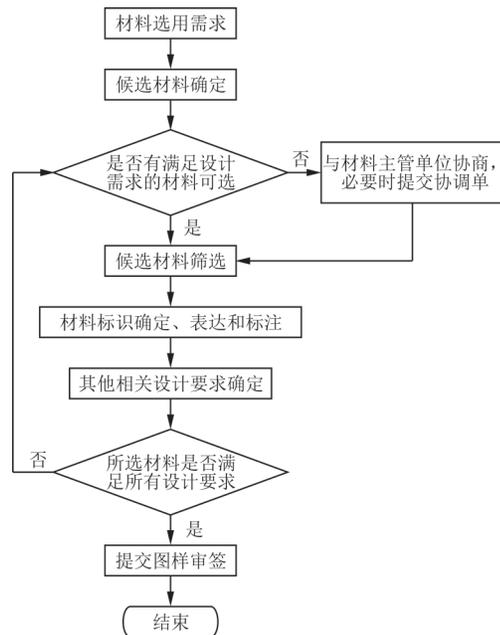


图4 材料选用管理程序

Fig. 4 The procedure of material selection management

(1) 材料选用需求提出

零组件设计所需材料的选用需求通常由零组件设计人员提出。材料选用需求的提出应充分考虑零组件的所有与使用材料相关的设计要求,并力求这些所有的相关设计要求都能被满足。零组件设计要求中与使用材料相关的设计要求通常主要包括但不限于以下内容:功能要求;载荷要求(包括动载荷、静载荷以及冲击载荷);可靠性要求;使用环境要求;维修性要求;经济性要求;使用寿命要求;外形尺寸和重量要求;加工和制造要求;质量检查要求^[21-22]。

(2) 候选材料确定

在确定候选材料之前,零组件设计人员必须首先明确零组件设计要求中与使用材料相关的设计要求的具体指标或数据范围,并尽可能将其转化为对相关材料使用特征信息(如材料种类、品种、牌号或材料名称、供应状态、规格、颜色、材料规范/标准等)的需求^[23-24],即制定材料优选目录,候选材料的确定必须以这些使用特征为依据。

(3) 筛选候选材料

对于同一个零件,当有多个候选材料满足设

计需要时,设计人员应在保证材料采购渠道畅通,不影响生产任务的前提下优先选择经济性最好的材料。材料的经济性一般应着重考虑以下 4 方面的因素:材料的价格因素;材料加工成本或生产技术成本;材料的库存现状;材料的维修以及处置成本等^[25-26]。

(4) 确定材料标识及其标注要求

在设计图纸中,材料标识通常由其材料信息组成,一般包括材料名称、牌号、规格、材料标准等,各个信息之间采用“-”来连接,如:聚四氟乙烯板-δ1.5-GJB 3026,对于确定选用的材料,零组件设计人员应按以下原则来确定该材料的材料标识:满足具体的设计要求;满足具体材料的基本采购要求;符合规定的材料规范/标准或材料主管单位确定的材料信息;一个材料标识对应唯一的一个材料^[27]。

而对于所有正式发出的设计图样和文件,不允许标注不完整、不准确以及材料信息随意简化或者随意组合的材料标识。材料标识的标注位置应尽可能固定和统一,应以清楚准确表达所用材料的材料标识为前提,必要时可在文件适当位置将该文件采用的所有材料的标识以列表的形式汇总给出,以确保生产部门能快速准确获取到这些材料标识的相关规定。

(5) 确定其他相关设计要求

其他相关设计要求主要包括零件的制造、加工、成形、表面处理、热处理、无损检查以及装配要求(装配要求仅适用于装配件)等。为了确保零组件后续的顺利生产、加工、装配和使用,零组件设计人员还应根据具体的设计需求并结合相关工艺要求对该零组件的其他设计细节进行确定,并在规定位置给出所确定的设计要求^[28-29]。

(6) 材料标识的审查

材料主管单位技术人员应对图样中选用的材料是否满足各类文件要求,以及所选材料的材料标识是否正确完整进行审核并签字确认。

1.3 制定材料替代管理程序

理论上来说,零件设计人员只要遵循上述材料选用管理的程序要求,就能高质量完成图样中的材料选材工作。但是在实际生产过程中,由于渠道、质量或者其他不可抗力因素,导致所选材料不可得或生产急需时频繁提出材料替代问题。因此为了避免延误生产进度,保证生产现场状况的

有序进行,还需对材料替代问题发生后的处理过程进行总结和分析,制定材料替代管理程序,如图 5 所示。

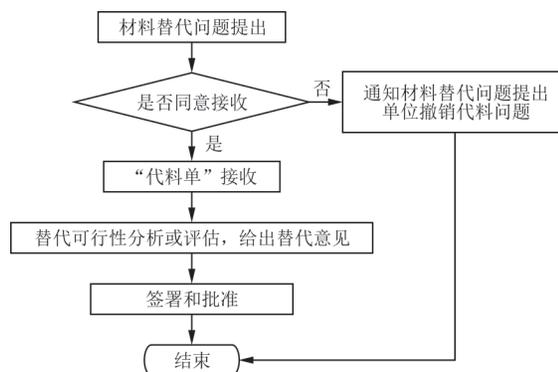


图 5 材料替代管理程序

Fig. 5 The procedure of material substituting management

(1) 材料替代问题的提出和接收

材料替代问题一般由零件生产部门提出,仅当设计图样中规定的材料不可得或者生产急需的情况下才允许提出。设计人员通过判断替代材料各方面性能指标是否均能满足(或不降低)零件的所有设计要求并不影响产品使用功能的实现来决定是否接收生产部门提出的材料替代问题。

(2) 代料单的接收

零件设计人员应负责接收生产部门提出的自己负责设计零件的“代料单”,并按权限处理该“代料单”所提的问题。

(3) 替代可行性分析或评估

替代可行性分析或评估可结合具体零件的所有相关设计要求进行。如果替代可行性分析或评估结果满足所有相关设计要求,则允许替代,否则不允许替代。

(4) 签署和批准

在签署处理结论为允许替代的代料单时,应先提交材料专业技术人员会签,以确保采用替代材料的材料标识正确完整和措施可行,并且所给处理意见应满足相关文件的规定。材料专业技术人员通过后还需提请用户代表批准,用户代表同意则允许代料,用户代表不同意,材料代料单立即作废。对于民用飞机,按照主制造商要求,应报适航工程委任代表会签。

2 实例验证

为验证材料选用和替代管理程序在飞机设计

与生产中的实际实施效果,本程序在某型军用飞机上进行应用。

2.1 材料选用程序

在进行某型机体结构密封材料的选材工作时,零件设计人员采用新型材料选用程序替代传统的直接参考旧图样中材料的做法,材料选用程序如图6所示。

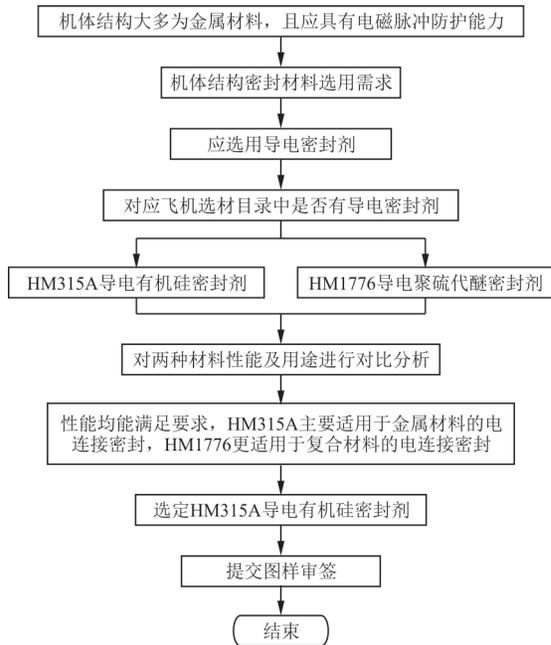


图6 某型飞机机体结构密封材料选用程序

Fig. 6 The selection procedure of sealing materials of a certain aircraft structure

(1) 对机体结构密封材料的选用需求进行分析:因机体结构具有电磁脉冲防护能力,需采取针对性电磁脉冲防护措施,在针对舱门、口盖、缝隙及孔等典型结构的防护方法中,需选用导电密封剂。

(2) 结合该需求,零件设计人员在对应飞机型号的选材目录中筛选确定两种候选材料:HM315A导电有机硅密封剂和HM1776导电聚硫代醚密封剂。

(3) 对两种候选材料的主要性能及用途进行分析对比,发现HM315A导电有机硅密封剂适合于金属导电材料接口缝内的电连接密封,而HM1776导电聚硫代醚密封剂更适合用于复合材料整体油箱以及电子设备舱的密封,飞机机体结构大多采用强度很高的金属材料,因此选定HM315A导电有机硅密封剂用于机体结构的

密封。

(4) 确定HM315A的材料标识,完成图样的发放。

2.2 材料替代管理程序

材料替代管理程序的实施保证生产现场状况的有序运行。例如在制造某型机电系统使用的导电垫片时,设计图样中所选T3铜合金材料库存紧缺,零件供应部门按照材料替代管理程序开展材料替代工作,具体工作流程如图7所示。

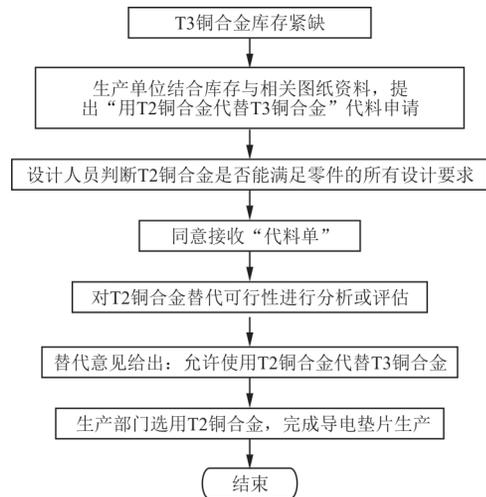


图7 某型机电系统导电垫片材料替代程序

Fig. 7 The substituting procedure of conductive gasket in the electrical system of a certain aircraft

(1) 零件供应部门结合库存情况,查阅相关图样或文件,提出“用T2铜合金代替T3铜合金材料”的代料申请。

(2) 设计人员在收到代料申请后,对T2和T3铜合金材料的各方面性能指标进行分析对比,判断出“T2铜合金均能满足导电垫片的所有设计要求”,同意接收生产部门提出的“代料单”。

(3) 设计人员对代料问题进行替代可行性及评估,给出“允许使用T2铜合金代替T3铜合金”的最终意见。

(4) 零件供应部门在收到回复的代料单后,选用T2铜合金完成导电垫片的生产。

综上所述,材料选用和替代管理程序的制定是确保材料管控体系有效运行的最佳策略,只有将这两项技术基础的应用都落到实处,飞机产品的研制能力才能真正提升,企业高质量发展才能得到根本保证。

3 结束语

本文从对飞机零组件设计中材料应用现状的分析入手,指出了目前设计人员在材料应用工作中存在的问题,给出了今后开展材料选用和替代工作应重点关注的技术内容以及应该遵循的工作流程,制定了切实可行的材料选用和替代技术管理程序,并对所提出程序的与时俱进性和所建立数据库的管理提出了建议。此项工作的开展将对于指导设计人员正确选材起到关键作用,并且对于解决今后新型号飞机材料设计及生产过程中的实际问题以及提升整个航空制造企业的产品正向设计能力大为有益。

但结合目前航空企业的高质量发展战略要求来看,仅制定材料选用和替代技术管理程序还是远远不够的,今后可在此基础上继续开展适应于三维数字化设计的材料数字化管理和应用技术的研究^[30-31],包括基于材料选择器的研发和材料数据库软件的建立^[32-34],为飞机零组件的材料设计工作提供强有力的技术支持。

参考文献

- [1] DENG Y M, EDWARDS K L. The role of materials identification and selection in engineering design[J]. *Materials & Design*, 2007, 28(1): 131-139.
- [2] STEWART J R, SWINDALL W J. *Material substitution* [M]. Netherlands: Springer, 1999.
- [3] 刘颖, 张霞, 吴学仁, 等. 军工材料管理要求: 第 I 部分——研制: GJB/Z 175.1[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2015.
LIU Ying, ZHANG Xia, WU Xueren, et al. The management requirements of military material: part I — development: GJB/Z 175.1[S]. Beijing: Commission of Science, Technology and Industry for National Defense, 2015. (in Chinese)
- [4] 刘颖, 邸彤, 章骏, 等. 民用材料管理要求: 第 I 部分——研制: HB 8508.1[S]. 北京: 国家国防科技工业局, 2015.
LIU Ying, DI Tong, ZHANG Jun, et al. The management requirements of civil material: part I — development: HB 8508.1[S]. Beijing: State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense, 2015. (in Chinese)
- [5] 叶永青. 谈谈航空产品的选材[J]. *材料工程*, 1991(3): 52-53.
YE Yongqing. Discussion on the material selection of aeronautical products[J]. *Journal of Materials Engineering*, 1991(3): 52-53. (in Chinese)
- [6] 马续君. 大型钢铁企业材料替代的系统性认识[J]. *化学工程与装备*, 2008(9): 176-178.
- [7] 贾文友, 刘莉, 徐振法. 机械产品设计中基于材料替代的成本控制[J]. *轻工机械*, 2009(3): 112-114.
JIA Wenyu, LIU Li, XU Zhenfa. Cost control in design of mechanical products based on the substituted materials[J]. *Light Industry Machinery*, 2009(3): 112-114. (in Chinese)
- [8] ASHBY M F, CEBOON D. Materials selection in mechanical design[J]. *Journal de Physique*, 1993, 3(C7): 1-9.
- [9] GUISEBIERS G, WAUTELET M. Materials selection for micro-electromechanical systems[J]. *Materials & Design*, 2007, 28(1): 246-248.
- [10] 王一龙. 飞机金属材料的选用探讨[J]. *冶金与材料*, 2018(4): 30, 32.
WANG Yilong. Discussion on the selection of aircraft metal materials[J]. *Metallurgy and Materials*, 2018(4): 30, 32. (in Chinese)
- [11] 何宇廷, 张腾, 崔荣洪, 等. 一种基于系列材料性能指标的飞机结构选材方法: CN201510679288.4[P]. 2016-04-27.
HE Yuting, ZHANG Teng, CUI Ronghong, et al. A material selection method for aircraft structure based on series of material performance indexes: CN201510679288.4 [P]. 2016-04-27. (in Chinese)
- [12] 蓝元沛, 孟庆春, 李锋, 等. 基于多属性效用理论的飞机设计选材方法[J]. *航空材料学报*, 2010, 30(3): 88-94.
LAN Yuanpei, MENG Qingchun, LI Feng, et al. Aircraft design material selection method based on MAUT theory [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2010, 30(3): 88-94. (in Chinese)
- [13] 袁晓波, 杨瑞成, 陈华, 等. 工程材料选用方法研究现状及发展趋势[J]. *机械工程材料*, 2004, 28(12): 1-3, 10.
YUAN Xiaobo, YANG Ruicheng, CHEN Hua, et al. Present status and prospects of materials selection in mechanical engineering [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2004, 28(12): 1-3, 10. (in Chinese)
- [14] 飞机设计手册编委会. 飞机设计手册: 第 3 册——材料 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2006.
General Editorial Board of *Aircraft Design Manual*. *Aircraft design manual: vol. 3—material* [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [15] 王程成. 航空材料质量管理中的若干问题探讨[J]. *大众标准化*, 2020(19): 16-17.
WANG Chengcheng. Discussion on some problems in aeronautical material quality management [J]. *Popular Standardization*, 2020(19): 16-17. (in Chinese)
- [16] 张日洪. 替代料管理系统的分析与设计[D]. 昆明: 云南大学, 2013.
ZHANG Rihong. Analysis and design of substitute materials management system [D]. Kunming: Yunnan University, 2013. (in Chinese)
- [17] 韩颖, 李丽君, 黄小原. 生产企业的材料替代策略[J]. *东北大学学报*, 2003, 24(9): 56-59.

- HAN Ying, LI Lijun, HUANG Xiaoyuan. Material substitution strategy for manufacturers [J]. Journal of Northeastern University, 2003, 24(9): 56-59. (in Chinese)
- [18] 李文正. 飞机设计流程解析[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.
- LI Wenzheng. Analysis of aircraft design process [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [19] 刘久战, 蔡安, 张晓静, 等. 中国民用飞机航空材料和材料标准体系研究探讨[J]. 航空制造技术, 2012(12): 68-71.
- LIU Jiuzhan, CAI An, ZHANG Xiaojing, et al. Discussion of aeronautical material and its specification used to China-made civil aircraft [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(12): 68-71. (in Chinese)
- [20] 王乐安, 韩希鹏, 李晓欣, 等. 航空发动机材料选用原则、程序与要求: HB/Z 353 [S]. 北京: 国家科学技术工业委员会, 2002.
- WANG Lean, HAN Xipeng, LI Xiaoxin, et al. Principles, procedures and requirements for aero-engines material research and development: HB/Z 353 [S]. Beijing: State Council of Science, Technology and Industry, 2002. (in Chinese)
- [21] 杨瑞成, 邓文怀, 冯辉霞. 工程设计中的材料选择与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- YANG Ruicheng, DENG Wenhui, FENG Huixia. Material selection and application in engineering designing [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [22] 王铁球. 产品智能化背景下工业设计中的材料选用分析 [J]. 智库时代, 2020(3): 293-294.
- WANG Tieqiu. Analysis of material selection in industrial design under the background of intelligent products [J]. Think Tank Era, 2020(3): 293-294. (in Chinese)
- [23] 王周让. 航空工程材料 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.
- WANG Zhouang. Aeronautical engineering materials [M]. Beijing: Beihang University Press, 2010. (in Chinese)
- [24] BRÉCHET Y J M, SALVO L. Selection strategies for materials and processes [J]. Advanced Engineering Materials, 2010, 4(6): 327-334.
- [25] 瞿家骅. 价值工程(VE)与材料应用 [J]. 机械工程材料, 1982(3): 62-64, 68.
- QU Jiahua. Value engineering and material application [J]. Materials for Mechanical Engineering, 1982(3): 62-64, 68. (in Chinese)
- [26] 王旭峰, 乔丽, 戚励文. 民航航材管理成本控制研究 [J]. 华人时刊, 2012(1): 92.
- WANG Xufeng, QIAO Li, QI Liwen. Research on cost control of civil aviation materials management [J]. Chinese Times, 2012(1): 92. (in Chinese)
- [27] 刘久战, 李旺波, 周晶. 飞机零件设计中材料信息的图样标注问题探讨 [C]// 第七届中国标准化论坛. 济南: 中国标准化协会, 2010: 685-689.
- LIU Jiuzhan, LI Wangbo, ZHOU Jing. Discussion on drawing indicating of material information in aircraft parts designing [C]// The 7th China Standardization Forum. Jinan: China Association for Standardization, 2010: 685-689. (in Chinese)
- [28] 北京航空材料研究院. 航空材料技术 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.
- Beijing Institute of Aeronautical Materials. Aeronautical materials technical [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [29] 姚卫星, 顾怡. 飞机结构设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
- YAO Weixing, GU Yi. Design of aircraft structure [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [30] 范玉青, 周建华. 产品三维数字化定义在波音飞机公司的应用 [J]. 航空工艺技术, 1996(2): 7-10.
- FAN Yuqing, ZHOU Jianhua. Product definition by 3D digitizing at Boeing Company [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1996(2): 7-10. (in Chinese)
- [31] 王鹏飞, 周秋忠, 徐万洪. 三维标注的产品数字化定义标准及其管理系统开发 [J]. 沈阳理工大学学报, 2014, 33(2): 76-80.
- WANG Pengfei, ZHOU Qiuzhong, XU Wanhong. The development of the management system and productive defined standards information about 3D annotation [J]. Transactions of Shenyang Ligong University, 2014, 33(2): 76-80. (in Chinese)
- [32] GUO Qiwen, CAI Hongnian, WANG Fuchi, et al. Research on technical framework construction of material database system [J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2011, 40(4): 305-308.
- [33] 沈军, 朱亦刚, 黄新跃, 等. 航空材料数据库领域的现状及展望 [J]. 航空材料学报, 2003, 23(1): 291.
- SHEN Jun, ZHU Yigang, HUANG Xinyue, et al. Progress and layout for the database domain of aeronautical materials [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2003, 23(1): 291. (in Chinese)
- [34] 夏晴, 殷国富, 胡晓兵, 等. 基于 Web 技术的工程材料数据库系统的开发 [J]. 机械, 2005, 32(4): 55-57.
- XIA Qing, YIN Guofu, HU Xiaobing, et al. Development of engineering material database system on Web [J]. Machinery, 2005, 32(4): 55-57. (in Chinese)

作者简介:

李红蕊(1992-),女,硕士,工程师。主要研究方向:飞机材料应用与管理。

种煜(1994-),男,学士,工程师。主要研究方向:飞机材料应用与管理。

(编辑:丛艳娟)