

某型发动机材料控制标准体系的研究建立

王 晔¹, 王 刚², 滕佰秋²

(1. 中航工业北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 中航工业沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘要:欧美航空发动机公司的健全的材料控制标准体系是保障材料质量稳定和发动机具有高性能的关键。阐述了欧美航空发动机材料控制标准体系特点,并介绍了某型发动机材料控制标准体系构建情况。针对某型发动机研制要求,研究建立了由材料批准与控制、检测控制、工艺控制标准构成的材料控制标准体系。为发动机关键重要材料制造全过程控制制定首件批准制度和实施主导工艺控制,为保障发动机冶金质量稳定可靠提供了重要技术支持。材料控制标准体系具有在航空发动机行业推广应用的意义。

关键词:材料控制;标准体系;冶金质量;航空发动机

中图分类号: V26-65

文献标识码: A

doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2016.04.019

Establishment of Material Control Standard System for an Aeroengine

WANG Ye¹, WANG Gang², TENG Bai-qiu²

(1. AVIC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China 2. AVIC Shenyang Engine Design and Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: Sound material control standard system in Europe and America aeroengine company is crucial to ensure material of consistent quality and high performance of engine. Material control standard system in Europe and America aeroengine company was described, and the construction of standard system for an aeroengine was introduced. For the development requirements of aeroengine, material control standard system was established involving approval and control of materials, material testing control, and process control. The standard system provided approval system of initial workpiece and implementation of dominated process control for key and important material of aeroengine. The standard system provided an important technical support to ensure metallurgical of consistent quality for aeroengine. The standard system has the significance to be promoted in aeroengine industry.

Key words: material control; standard system; metallurgical quality; aeroengine

0 引言

现代航空发动机性能指标的实现在很大程度上取决于其材料和制造技术水平^[1-7],即冶金质量保障能力。冶金质量保障能力由 4 方面决定:工艺和设备条件、材料标准(包括热工艺标准、检测标准)、检测技术、过程控制。其中,材料标准直接关系着材料的技术水平和生产质量,健全的材料标准体系是航空发动机冶金质量稳定可靠的重要保障^[8]。

某型航空发动机是中国立项研制的第 1 型大涵道比涡轮风扇发动机,具有大推力、低耗油率、长寿命、高可靠性的优点,应用了诸多新材料、新工艺,并

引入了适航管理要求^[9]。适航管理要求中强调发动机材料要符合经批准的规范,且要求批生产产品质量一致,并对重要产品采用首件批准制度^[10],因此需要对零部件制造全过程进行控制,同时需要相应的材料标准和工艺规范提供支持^[11]。

中国已建立航空发动机材料标准基本体系,其主体为各类材料验收、热加工工艺、检测评价方法的技术标准,辅以少量材料管理标准^[12-15]。以往军用发动机没有适航管理要求,因此材料标准体系中未系统地制定对材料制造过程进行控制的标准,即材料控制标准。在现有标准体系中,缺少对材料生产厂、原材料和工艺辅助材料、检测过程、热加工工艺质量控制的标

收稿日期:2016-02-29

作者简介:王晔(1968),女,高级工程师,主要从事航空发动机材料标准化工作;E-mail:wangye621@sohu.com。

引用格式:王晔,王刚,滕佰秋.某型发动机材料控制标准体系的研究建立[J].航空发动机,2016,42(4):98-102. WANG Ye, WANG Gang, TENG Baiqiu. Establishment of material control standard system for an aeroengine[J]. Aeroengine, 2016, 42(4): 98-102.

准或标准不适用。例如:关键件和重要件的质量控制、外购器材的质量管理等材料控制管理国军标内容宽泛,对于航空发动机关键重要锻铸件的过程控制无针对性;高温合金锭等各类原材料及铸造、锻造重要工艺辅助材料控制标准薄弱,影响了零部件制造质量的稳定性;锻造工艺质量控制、熔模铸造工艺质量控制等热加工工艺质量控制国军标技术内容落后、可操作性不强,不能适应热加工生产的需要^[10];而材料检测评价标准中,缺少对无损与理化检测过程的控制标准,在一定程度上影响了产品检测技术的实施效果。中国航空发动机材料标准体系中控制标准薄弱,无法为材料和零件制造全过程控制提供有效技术支持,不能满足某型发动机高可靠性、长寿命设计要求以及适航管理要求。相比之下,欧美航空发动机材料标准体系健全,特别是材料控制标准完善,对于其材料质量和发动机性能提供了重要保障。

本文简要阐述了欧美航空发动机材料控制标准体系的特点,介绍了中国某型发动机材料控制标准体系构建情况,以期为建立中国航空发动机行业材料控制标准体系提供参考。

1 欧美航空发动机材料控制标准体系特点

1.1 控制标准范畴

西方航空发动机可靠性高、寿命长、质量稳定性好、成本具有竞争力,是通过建立各类材料平台、健全材料标准体系、严格控制生产过程实现的。其中,健全的材料标准体系是确保材料品质不断提高和稳定的关键环节。

为满足发动机零部件的设计要求及产品质量要求,GE(General Electric Company)、PW(Pratt & Whitney Group)、RR(Rolls-Royce)等欧美航空发动机公司除少数材料采用AMS等通用标准外,对发动机关键材料均制定了完整、配套的公司规范,材料及零件验收标准、检测规范的针对性强,同时强化产品制造过程中的控制,制定了大量控制标准,涉及锻铸件及原材料、非金属材料、复合材料、特种工艺的批准与控制,首件批准要求包,各类材料的检验、试验程序与要求,各类工艺控制规范,工艺设备批准与控制等方面。

控制标准是欧美发动机公司进行产品过程控制、保证质量的核心文件。通过在材料和零件生产过程中实施供应商控制、材料检测试验控制、工艺控制,最终

实现对材料制造全过程的质量控制,有效保障了发动机材料及零部件的冶金质量。

1.2 供应商控制标准

GE、PW、RR公司均制定了完善的供应商控制标准,规范材料和工艺的批准程序、方法、要求。例如《工程来源批准》、《锻造产品的试验室批准与控制程序》、《铸造产品的试验室批准与控制程序》、《制造零件用原材料的采购和控制》、《合金熔炼过程的风险控制》、《关键零件用坯料和锻件供应商的控制程序》、《特种工艺和材料供应商的审核、批准与控制》、《制造来源和方法更改批准》、《供应厂商对超差品的控制》和《零件可追溯性要求》。

欧美航空发动机公司将供应商控制标准在零件设计图上标明,实现了对材料和特种工艺供应商的审核、批准和全面控制。例如某公司IN718盘和相关转动件的图样标明:试验室批准与控制程序按《锻造产品的批准与控制》和《镍基合金熔炼过程中的风险控制》执行,同时标注了可追溯性控制、来源和方法批准、特种工艺批准与控制等标准。

对于关键零部件用金属原材料,国外发动机公司制定了合金熔炼过程中的风险控制标准,除规定可能对材料产生污染的一切风险的控制措施,还规定了对熔炼用主要金属和金属元素制造商的控制要求、使用回炉料的控制要求。发动机公司按规定的程序评估和控制材料熔炼过程中的风险,使熔炼程序中的关键工序处于连续监控状态,通过统计分析和实时监控确保制造和工艺控制到位。

欧美发动机公司还制定了关键重要零件首件批准要求包,对原材料、锻铸件、零部件的制造全过程进行控制,如IN718合金锻造第4级低压涡轮盘的供货状态批准包,在固化工艺的同时,保证批生产产品质量的一致性。

1.3 材料检测试验控制标准

欧美发动机公司针对发动机零件制造用各类金属材料建立了检验和试验程序(例如:《转动件用锻造产品的检验和试验程序》);针对各类非金属和复合材料,将检验和试验程序与材料批准要求在1项标准中规定(例如:《橡胶件的批准、检验和试验程序》、《预浸料的批准、检测和测试程序》);还建立了各类产品的取样和试验要求(例如:《锻坯和锻件持久试验的重新取样和重新试验程序》、《铸造涡轮叶片持久试验程

序》); 为避免试样加工不当影响材料性能评价结果, 制定了试样机加工程序要求。将材料的检测试验控制要求在零件设计图上标明, 例如某公司 **IN718** 盘和相关转动件的图样标注: 检测和试验程序按《用于轴类、盘类及相关旋转零件的可锻合金的检验和试验程序》; 试样加工按《金属材料试验试样机加工程序要求》。

鉴于材料及零件的理化检测质量受检测人员、检测过程、设备器材、检测材料等诸多因素的影响,欧美发动机公司重视建立理化检测控制标准,将其作为检测机构资质审核的依据,理化检测过程控制一般采用 NADCAP 材料试验室审核标准,如《NADCAP 对材料试验室力学试验的审核标准》。

各类材料检测试验控制标准规范了材料的检测和试验程序与要求,有助于材料供应商和发动机公司对材质进行准确评价。

1.4 工艺控制标准

欧美发动机公司对国际通行的民用航空发动机制造中需控制并进行 **NADCAP** 批准的 9 种特种工艺,制定了大量工艺控制规范,涉及复合材料制造、热处理、化学加工、焊接、表面硬化、无损检测、涂层、非传统加工、关键零部件传统加工。实施工艺控制规范有效保证了制造过程中对产品的管理和控制。

欧美发动机公司在工艺控制规范中严格考核供应商的生产主导工艺参数,对影响产品质量的因素和生产工艺参数变化的控制要求非常详尽,涵盖生产厂商的要求、设备(包括工装、模具)的要求、材料(原材料和工艺材料)、工序操作和检验要求及工艺参数的控制,但不涉及工艺参数具体数值。

鉴于设备条件对冶金质量保障有重要影响,欧美发动机公司标准中对制造过程中的设备进行严格控制,专门制定《加热炉和相关设备以及材料热处理的控制程序》标准,规定了对加热炉和模锻用压力机的批准与控制要求等。

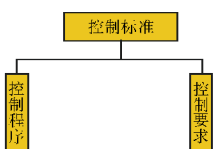
欧美发动机公司将无损检测纳入制造工艺的范畴,重视对检测质量各影响因素的控制,对检测设备、器材控制一般采用通用的 ASTM 标准;对于无损检测实验室控制,各公司通常根据产品检测特点及关注点各自制定公司规范,例如《对锻件供应商实施锻造盘超声检测的监控程序》。对水浸超声检测、荧光检查、腐蚀和目视检查等无损检测设备,各公司均须履行批

准程序。

2 某型发动机材料控制标准体系的构建

2.1 体系构建基本思路

为满足某型发动机高可靠性、长寿命设计要求和适航管理要求,在型号研制中,借鉴欧美航空发动机材料控制标准体系经验,总结中国航空锻铸件生产厂在外贸和转包生产中已接受的欧美发动机公司对制造过程的审核与控制的经验,确立了建立覆盖发动机零部件制造全过程的型号材料标准体系的主旨。除建立健全材料和工艺验收、工艺方法及工艺质量检验、检测评价方法的技术标准体系,还研究建立了由材料批准与控制标准、检测控制标准、工艺控制标准构成的控制标准体系。



```

graph TD
    A[控制标准] --> B[控制程序]
    A --> C[控制要求]
  
```

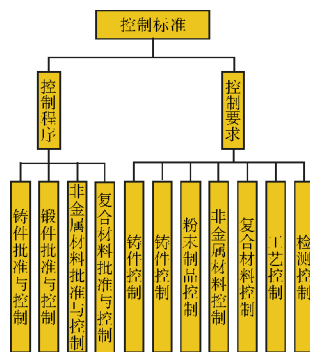


图 1 某型发动机材料控制标准体系框架

某型发动机材料控制标准分为“控制程序”、“控制要求”2类,包括材料批准与控制程序,材料、工艺及检测控制要求,标准体系框架如图1所示。

2.2 材料批准与控制标准

2.2.1 材料批准与控制程序类标准

2.2.1.1 关键重要件

为制定型号发动机关键重要零部件的首件批准制度,制定了《锻件批准与控制要求》、《铸件批准与控制要求》2项控制程序类标准,用于规范锻铸件新产品试制、验证、批准程序,以及研制生产中的控制要求,标准主要包括:

- (1)规定新产品研制批准程序及评估要求,包括批准失效与重新批准要求;
- (2)主导工艺的批准与控制要求:识别主导工艺参数,规定主导工艺控制卡批准流程,规范主导工艺记录、工艺变更控制、现场工艺检查要求;
- (3)规范产品试制生产工艺控制要求,例如:锻坯和锻件交付图、下料、加热控制、成形控制、热处理控制、表面清理控制、粗加工控制、检测、标识和记录、可追溯性、交付和质量证明文件要求、试样和记录的保存;
- (4)明确已批准产品的工艺更改、冶金问题报告、

技术监督和周期检验要求。

2.2.1.2 非关键重要件

对于某型发动机功能性零件大量采用的各类非金属材料,尽管用于非关键重要部位,吸取其他型号发动机压气机叶片塑料衬套引起发动机严重故障的教训,制定了《非金属材料批准与控制要求》,以规范橡胶、塑料、涂料、胶粘剂、密封剂、润滑材料、纤维制品、石墨、玻璃等材料的研制、生产要求。

对于该型发动机风扇部件零件应用的复合材料构件,积累一定经验后,将研究制定《复合材料批准与控制要求》标准。

2.2.2 材料控制要求类标准

鉴于锻铸件研制生产工艺复杂,锻铸件控制标准以控制程序标准为顶层文件,辅以一系列控制要求标准,对相关要求进一步细化和补充。

分别制定了锻件、叶片铸件、结构铸件《主导工艺控制要求》,从生产过程、检测方法2方面提出锻坯和锻件、叶片铸件、结构铸件生产主导工艺控制要素,不仅对零部件制造工艺过程中的各主要工艺(如:熔炼浇注、锻造成形、热处理)提出可量化、可控制的各工步参数控制要求,对同样影响零部件冶金质量和合格率的辅助材料(如:铸造型芯、型壳、蜡模、锻造润滑剂等)辅助工序(如:制芯、制模、铸件补焊工艺等),也提出具体控制要求。《主导工艺控制要求》标准是对型号发动机关键重要零部件实施主导工艺控制的技术依据。

针对铸件在研制生产中出现的冶金问题的呈报与处理,制定了《冶金问题报告要求》,以利于在后续加工装配中进行质量监控,并就冶金问题可能对发动机整体性能产生的影响予以综合评判和处理,同时实现冶金问题数据和经验在行业内共享。

对锻铸产品在设计输入中的图样设计要求进行规范,制定了《零件图样铸造工艺性审查规定》、《铸件图样技术要求》、《锻件交付状态图要求》,以利于优化研制、生产,减少重复设计、研制。

加强对高温合金母合金的控制,制定了《高温合金锭批准与控制要求》、《高温合金锭主导工艺控制要求》,从源头控制铸造叶片、机匣等关键重要铸件质量;为规范铸造辅助材料的控制与管理,制定了《熔模铸造辅助材料控制要求》。

针对型号发动机应用的粉末高温合金涡轮盘,制定了《粉末高温合金制件用粉末和坯料的控制要求》

标准,通过控制盘锻件用材料质量,保证涡轮盘零件的冶金质量。

2.3 检测控制标准

为确保型号发动机产品检测结果真实可靠,制定了材料及零件无损检测以及理化检测控制标准,通过对试验室的管控以及对人、机、料、法、环等影响检测质量的因素进行过程控制,为提高各试验室检测数据的一致性、可靠性和准确性提供系统性标准支持。

制定了《无损检测控制程序》标准,规定了型号产品供应商对材料和零件进行无损检测过程控制的一般要求和实施方法;针对盘锻件供应商,制定了超声检测监控程序标准,确保型号产品无损检测条件一致、可重复;针对盘件和管棒材超声水浸检测系统,制定了检测系统要求和评价方法标准。

为规范各理化实验室的实验过程、方法,制定了《材料检测实验室控制要求》、《材料检测实验室重复试验和替代试验控制要求》;针对化学成分分析、力学性能试验、金相与显微硬度试验、硬度试验分别制定了控制要求标准,制定了《金属材料力学性能试样制备要求》。

为规范关键材料的检验与检验要求,制定了《锻坯和锻件取样与试验要求》,对叶片铸件、结构铸件制定了尺寸检测控制要求标准。

2.4 工艺控制标准

工艺控制标准是实施型号产品制造工艺过程控制的先决条件。针对型号产品制造加工生产应用的真空电子束焊、惯性摩擦焊接等先进焊接连接技术,叶片真空热处理、渗层处理工艺,真空电弧镀、电子束物理气相沉积等先进涂层技术,零件喷丸强化、电加工工艺等,制定了工艺参数量化的工艺标准,以及新型工艺的工艺控制标准,对各种影响工艺质量的因素予以必要的控制,包括操作人员技能、工艺设备能力、工艺材料、工艺方法(包括工序安排、各工序操作要点及应控制的工艺参数、工序检验要求、工艺验证要求、工艺记录要求)、工艺环境等要求,通过规范零件制造工艺过程的控制要求,保证产品工艺质量稳定。

为弥补热加工工艺质量控制国军标的不足,制定了《锻造加热温度控制要求》、《锻件晶粒流线要求》、《结构铸件尺寸校正工艺控制要求》、《精铸件模具控制要求》等标准,强化了对锻造工艺、铸造辅助工艺和铸造工装的控制。

3 结束语

在某型发动机研制中研究建立的材料控制标准体系,已制定出材料批准与控制标准、检测控制标准、工艺控制标准 35 项,涉及锻铸件、非金属材料的批准与控制,无损检测过程控制、理化实验过程控制、锻铸件产品检验要求,制造工艺控制要求。系列材料控制标准能够规范某型发动机材料试制、验证及批准程序,控制材料和零件生产、检测过程,为按适航管理要求制定关键重要产品首件批准制度和实施主导工艺控制提供了有力技术支持,为保障发动机冶金质量稳定可靠奠定了重要基础。

型号标准经在某型发动机适量应用验证以及在其他重点型号发动机研制中应用验证后,又进一步修改完善,可上升为行业以上标准,向航空发动机全行业推广,为提升中国航空发动机整体冶金制造能力发挥作用。

参考文献:

- [1] 刘大响.高性能航空发动机的发展对材料技术的要求[J].燃气涡轮试验与研究,1998,11(3):1-5.
LIU Daxiang. Demand for material technology of high-performance aero-engine [J]. Gas Turbine Experiment and Research,1998,11(3): 1-5. (in Chinese).
- [2] 王增强.高性能航空发动机制造技术及其发展趋势[J]. 航空制造技术,2007(1):52-55.
WANG Zengqiang. Development and trends of manufacturing technology of high-performance aero-engine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2007 (1):52-55. (in Chinese).
- [3] 马建宁,杨海,方红文,等.新一代航空发动机先进制造技术[J]. 航空制造技术,2008(3):60-63.
MA Jianning,YANG Hai,FANG Hongwen,et al. Advanced manufacturing technology of new aero-engine [J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2008 (3):60-63. (in Chinese).
- [4] 黄维,黄春峰,王永明,等.先进航空发动机关键制造技术研究[J].国防制造技术,2009(3):42-48.
HUANG Wei,HUANG Chunfeng,WANG Yongming,et al. Key manufacture technology research of advanced aero-engine[J]. Defense Manufacturing Technology,2009 (3):42-48. (in Chinese).
- [5] 金捷,钟燕.先进航空发动机设计与制造技术综述[J].航空制造技术,2012(5):34-37.
JIN Jie,ZHONG Yan. Design and manufacturing technology of advanced aeroengine [J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2012 (5):34-37.(in Chinese).
- [6] 郭德伦,韩野,张媛.航空发动机的发展对制造技术的需求[J]. 航空制造技术,2015(22):67-72.
GUO Delun,HAN Ye,ZHANG Yuan.Demand for manufacturing technology of aeroengine [J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2015 (22):67-72. (in Chinese).
- [7] 颜鸣皋,吴学仁,朱知寿.航空材料技术发展现状与展望[J].航空制造技术,2003(12):19-25.
YAN Minggao,WU Xueren,ZHU Zhishou.Recent progress and prospects for aeronautical material technologies[J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2003 (12):19-25.(in Chinese).
- [8] 王晔,滕佰秋.某型航空发动机冶金型号标准编制[J]. 航空发动机,2007,33(4):52-54.
WANG Ye,TENG Baiqiu. Establishment of metallurgy model standard for an aeroengine [J]. Aeroengine,2007,33(4):52-54. (in Chinese).
- [9] 张丹玲,郝勇,王德友,等.中国大涵道比涡扇发动机适航技术初步研究[J]. 航空发动机,2011,37(4):58-62.
ZHANG Danling,HAO Yong,WANG Deyou,et al. Preliminary investigation of airworthiness technologies for high bypass ratio turbofan engine in China[J]. Aeroengine,2011,37(4): 58-62. (in Chinese).
- [10] 韩秀峰,徐瑶,张燕,等.首件批准制度的应用 [J].中国质量,2015(4):117-120.
HAN Xiufeng,XU Yao,ZHANG Yan,et al. Application of the first article approval system[J]. China Quality,2015(4):117-120. (in Chinese).
- [11] 韩秀峰.商用航空发动机工艺规范体系构建探讨[J].航空制造技术,2015(22):62-66.
HAN Xiufeng.Discussion on commercial aeroengine process specification system establishment [J].Aeronautical Manufacturing Technology,2015(22): 62-66. (in Chinese).
- [12] 航空发动机材料标准体系课题组.中国军工材料体系——航空·发动机[M]. 北京:国防工业出版社,2002:387-524.
Research Group of Aeroengine Material. Military material system in China aeronautic and engine [M]. Beijing:National Defense Industry Press,2002:387-524.
- [13] 王晔.航空发动机材料标准分析[J]. 航空材料学报,2003,23(S1):267-271.
WANG Ye. Analysis on standards for aeroengine materials[J]. Journal of Aeronautical Materials,2003,23(S1):267-271.(in Chinese).
- [14] 王晔.航空发动机主要零部件材料标准发展现状分析[J].航空标准化与质量,2004,(5):35-38.
WANG Ye. Analysis on current development of material standards for major parts of aeroengine [J]. Aeronautic Standardization and Quality,2004 (5):35-38.(in Chinese).
- [15] 刘启国,代冰,于宏军,等.关于航空发动机标准体系建设的思考与探讨[J]. 航空标准化与质量,2010(2):9-12.
LIU Qiguo,DAI Bing,YU Hongjun,et al. Consideration and discussion on standard system construction of aeroengine [J]. Aeronautic Standardization and Quality,2010 (2):9-12.(in Chinese).
- [16] 袁文明,刘颖.航空材料标准化现状与发展对策[J].航空标准化与质量,2010(3):27-29.
YUAN Wenming,LIU Ying. Current situation and developing countermeasures of aeronautic material standardization [J]. Aeronautic Standardization and Quality,2010 (3): 27-29.(in Chinese).

(编辑:赵明菁)