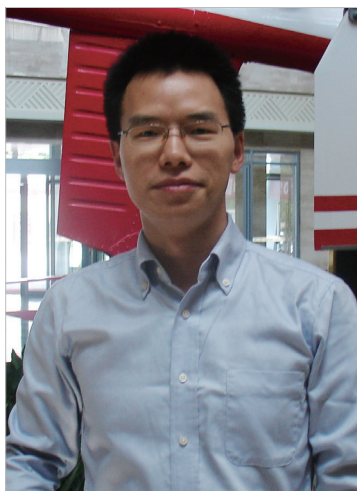


# 商用航空发动机工艺规范体系 构建探讨

## Discussion on Commercial Aeroengine Process Specification System Establishment

中航商用航空发动机有限责任公司 韩秀峰



韩秀峰

高级工程师,毕业于西北工业大学。主要从事航空发动机制造技术工作。

说明了工艺规范体系在商用航空发动机项目研制中的重要作用,分析了商用航空发动机工艺规范的适航要求和国内外现状,阐述了商用航空发动机工艺规范体系构建的思路和原则,提出了商用航空发动机工艺规范体系构建的实施途径。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.22.062

过 1850K<sup>[1]</sup>,必须采用更先进、更可靠的制造工艺才能实现。工艺规范(标准)是对工艺技术的总结、提炼和提高,是保证和控制产品加工制造质量的依据<sup>[2]</sup>。工艺规范体系是航空发动机标准体系的重要组成部分,健全和完善的商用航空发动机工艺规范体系是保障和提升我国商用航空发动机产品质量的重要技术基础,是商用航空发动机研制项目的迫切需求,也是我国商用航空发动机拥有自主知识产权的重要标志,同时也作为商用航空发动机适航取证必要的支撑技术体系。

我国和俄罗斯习惯将工艺分为冷工艺和热工艺,西方则分为一般加工工艺和特种工艺。特种工艺被定义为可改变产品的固有物理性能、化学性能、电性能或冶金性能的工艺,或者是在产品制造过程中使用特种

加工方法去除或增加产品材料,在产品加工完成后无法用非破坏性方法对产品性能进行全面检测的工艺。正是由于产品经特种工艺加工后,产品性能难以检测,需要对工艺质量的影响因素(如操作人员技能、设备能力、工艺材料、加工方法甚至加工环境等)进行必要的过程控制,而特种工艺的工艺规范是实施过程控制的先决条件。GE公司的特种工艺目录中包括了无损检测、热处理、焊接、涂层、化学处理和特种加工等,同时也将熔炼、锻造、铸造和关键转动件的机械加工(如车削、铣削、拉削、孔加工)列为特种工艺。NADCAP(National Aerospace and Defence Contractors Accreditation Program)是专门针对航空航天业特种工艺认证的全球协作组织,其成员包括了以波音、空客为代表的飞机制造商和以

商用航空发动机要求高可靠性、长寿命、高性能,并要求通过适航取证,对制造工艺提出了更高的要求。当今第三代商用发动机(如PW4000、GE90、TRENT系列)每百万飞行小时的空中停车要少于3次,大修时间间隔为10000~20000飞行小时以上;热端部件寿命要求10000个循环以上,冷端部件寿命要求20000个循环以上,总压比超过40,涡轮前温度超

GE、P&W、R·R 为代表的飞机发动机制造商。NADCAP 认证已得到了广泛认可并作为国际航空航天业对特种工艺的强制要求,现在各主要的航空企业都要求其供应商必须取得 NADCAP 认证。NADCAP 特种工艺认证已涵盖了化学处理、涂层、关键转动件的机械加工、焊接、热处理、特种加工(电火花加工、电化学加工、激光加工等)、无损检测、表面强化、复合材料及非金属成形、金属及非金属材料测试,而且目前 NADCAP 也正在筹划将其认证范围扩展至熔炼、锻造及铸造工艺。

商用航空发动机工艺规范体系建设是商用航空发动机研制的一项非常重要的基础性工作,同时商用航空发动机研制项目是一项非常复杂的系统工程项目,涉及多家供应商的协同,需优化各项资源。鉴于我国商用航空发动机工艺规范体系的空白,急需构建可满足适航及商用航空发动机研制要求的工艺规范体系,指导各参研单位开展设计、制造工作,规范整个研制流程。

## 适航对商用航空发动机工艺规范的要求

商用航空发动机的适航取证与规范紧密相关,局方对航空产品的合格审定是基于申请人对规范的正确使用并满足规范要求。若申请人采用的是工业界现行的规范及相关数据,将有助于适航取证过程,而且可大大降低相关的费用。

### 1 适航条令要求

适航条令对工艺规范的定义为:需经严密控制才能保证持续生产出符合型号设计的优质产品的技术规范。工艺规范或说明书主要包括适用范围、制造过程及控制要求、所用材料、设备和人员的控制要求,以及质量控制标准与记录、储存要求或其他保护性措施。

局方要求申请人提交工艺规范

并获得批准。局方在 AP-21-03R4 《航空器型号合格审定程序》中强调指出:在所有的工艺规范得到批准之前是不可能颁发型号合格证或型号设计批准书的。同时,对工艺和工艺过程提出了明确的要求:(1)是否每一种特种工艺都有相应的工艺规范;(2)申请人是否已经提交了工艺规范给有关审查代表审查;(3)对于已加工件的检查是否表明了该工艺方法能够始终加工出符合型号设计的零件,是否有统计证据或其他证据能够表明这一点;(4)正在操作中的工艺是否遵循其工艺规范要求,是否记录了任何偏离。

局方在 AP-21-14 《补充型号合格审定程序》中规定,在向局方提交的说明性资料包中应包括零部件制造和装配所必需的工艺规范。工业标准或规范包括国家标准和国家级的各行业标准,例如 GB(中国国家标准)、GJB(中国国家标准)、HB(中国航空工业标准)等,美国的 MILITARY(军用)标准、SAE(美国机动工程师协会标准)的宇航标准(AS)、美国联邦航空局(FAA)咨询通告 AC43.13-1A 和 2A 中所提到的标准等,也可采用其他的工业规范或自行制定的规范。若自行制定规范,规范中应完整而明确地规定:使用的材料、详细的程序、关键的工序、温度、时间、检验标准、返工的限制等。局方将对自行制定的规范进行审查。

### 2 自行制定的工艺规范批准要求

适航条令对工艺规范提出了严格的要求,对于申请人自行制定的工艺规范,局方按 AP-21-03R4 《航空器型号合格审定程序》对工艺规范批准的过程如下:(1)申请人与局方沟通后制定审定计划(CP);(2)申请人依据审定计划(CP)编制试验大纲;(3)试验大纲经局方批准后开展验证试验,并接受局方的检查(制造符合性、目击试验);(4)申请人按照试验结果编制试验报告,提交局方批

准。

自行制定的工艺规范要获得局方的批准,其中最关键的是工艺验证试验,要向局方证明工艺规范的合理性。开展工艺验证试验的周期较长、所需的经费多,若能向局方证明工艺参数的影响趋势或规律,就有可能减少某些组合的工艺验证试验来缩短周期、降低成本,否则就必须证明各种工艺参数组合下的结果。

工艺验证试验的验证条件应尽量与生产条件一致,要覆盖工艺的极限条件,而且要有充足的工艺循环与数理。工艺验证试验的考核指标可不限于工艺规范中规定的工艺性能,比如喷丸工艺规范中要求测试疲劳性能,但由于设计采用喷丸工艺主要目的是提高疲劳强度,因此针对喷丸工艺规范的工艺验证试验中也可能考核疲劳性能。

在自定工艺规范时,应注意以下 3 方面要求。

#### (1) 工艺规范格式。

局方对自定的工艺规范给出了建议的规范格式如下:

- 适用范围。
- 适用文件。
- 质量要求。
- 工艺过程中使用的材料。
- 制造。包括:制造的操作;制造的控制;试件;工装设备检定;工装设备控制。
- 检验。包括:过程检验;检验记录;检验试验;检验控制;加工项目的检验。
- 操作和检验人员的资格控制。

局方对工艺规范的内容也有严格的要求,明确规定对于任何工艺过程,提交批准的工艺规范及相关资料都不应含有可以得出各种不同解释的内容和词句,诸如足够的、如需要、如要求、室温以及定期等类的词句。规范中应当明确规定那些在过程中要求控制的工艺参数及其容差。

#### (2) 工艺规范控制要求。

局方要求审查实际操作过程和工艺规范,确认工艺规范对那些只有受控才能保证合格的和始终如一的产品参数规定了必要的控制要求,例如工艺原材料、工艺设备、生产设施、环境、检测设备以及生产操作者等。并且,应对这些必要的控制要求确定测量的计量单位和可接受的门限值、有关测量技术的叙述,以及当实际测量不符合可接受标准时所应采取的措施。

### (3) 工艺过程能力。

局方要求工艺过程能始终加工出符合型号设计要求的產品,并建议使用统计数据确定工艺过程能力,但并未给出明确的可接受的门限值。

工艺过程能力是指在一定时间里,处于控制状态(稳定状态)下的实际加工能力。工艺是指操作者、设备、原材料、工艺方法和生产环境 5 个基本因素(即 4M1E)综合作用的过程<sup>[3]</sup>。局方建议采用统计方法确定工艺过程能力,通常以工艺过程能力指数  $C_{PK}$  值来衡量。在项目研制初期,可能缺少统计数据,可采用其他产品相同工艺的数据。

$C_{PK} = \text{MINIMUM} (USL - AVG, AVG - LSL) / (3\sigma)$ ,  
其中,USL 代表规范允许的上限,LSL 代表规范允许的下限,AVG 代表平均值, $\sigma$  代表标准偏差。

对于工艺过程能力,一般没有明确的要求其  $C_{PK}$  必须达到某一个值。 $C_{PK}$  值越高,代表工艺越稳定。当  $C_{PK}$  值为 1 时,代表缺陷率超过 3‰,因此有些公司把  $C_{PK}=1$  定为门槛值,若  $C_{PK}$  值小于 1 则一般被认为工艺不成熟,需要进一步地进行攻关。AS9103(关键特性管理)中将  $C_{PK}$  值大于 1.33 定为工艺过程稳定, $C_{PK}$  值等于 2 定为工艺非常成熟。若工艺过程能力不能达到要求,可采取的措施有:在设计许可的范围内放宽验收指标,验收指标放宽后  $C_{PK}$  值将相应提高;增加工艺控制,如增加中间检验,确保

只有经检验合格的产品才能进入下道工序。

国外航空发动机公司针对不同工艺的特点,对工艺过程能力制定了明确的评价方法。比如 GE 公司对热喷涂工艺就制定了严格的、详细的工艺过程能力评价方法,并对样本数量和取样频率提出了明确要求,规定  $C_{PK}$  值(规范要求的所有验收指标,如结合强度、硬度等)大于 1.3 以上才允许用于零件加工,并且在批产后除工艺要求的正常检测外,还要求采用统计过程控制方法(Statistical Process Control)对工艺能力进行持续地监控。P&W 公司对工艺过程能力也有明确要求:对于数量变量,要求  $C_{PK}$  值不小于 1.33,并且规定样本数量为 25 个以上的连续检测值,样本中不允许出现超差;对于属性变量(如通过/不通过),要求样本数量为 45 个以上的连续检测值,样本中不允许出现超差。

## 国外航空发动机公司工艺规范体系分析

国外航空发动机公司已建成完善的工艺规范体系,并有严格的规范制定流程。工艺规范体系具有通用性,适用于各企业的不同型号。随着航空产业快速走向研发、制造的全球化,国际协作日渐增多,由于原先基本都是企业制定的工艺规范,复杂繁琐的工艺规范体系不便于全球设计和制造,为更好地利用全球的设计、制造能力,降低供应链采购产品的复杂性,国外航空发动机公司都对其工艺规范体系进行了整合优化:一方面大量采用工业界规范,如 AMS、MIL、ASTM 等;另一方面针对工业界规范确实无法满足要求的情况,企业也以简化、优化为目标制定工艺规范。企业制定的工艺规范主要规定了工艺过程的控制和工艺质量的保证要求,一般不指定具体的工艺方法或工装设备,而具体的工艺方法和工

艺参数则由制造供应商自行确定。

SAE (Society of Automotive Engineers, 美国机动车工程师学会)编制的 AMS (Aerospace Material Specification, 美国宇航材料规范)已获得国际航空航天业的公认并被广泛采用。自 1939 年至今,SAE 共发布了 3100 多份 AMS 规范,其中 1270 多份已被美国国防部采纳。AMS 规范不仅包括材料标准,也有大量的工艺规范,涵盖了热处理、焊接、化学处理、表面强化、无损检测等特种工艺。AMS 规范由宇航业用户、供应商、生产商及军方代表组成的 14 个专业委员会定期会面,讨论制定新的规范或对现行规范进行修订。SAE 规定每 5 年必须对每份 AMS 规范进行修订。近年来,AMS 加强了特种工艺规范的制定,新编或修订规范的速度明显加快。国外航空发动机公司(如 GE、R·R 公司等)也都大量采纳 AMS 材料标准和工艺规范,在新设计的型号中,原有的企业标准有不少已被 AMS 规范替代。P&W 公司也采纳了不少的 AMS 材料标准和工艺规范,甚至对于一些 AMS 规范确实不能完全满足要求的情况下,也不都是重新制定企业规范,而是尽可能地通过在 AMS 规范的基础上裁剪或补充附加要求来实现。

国外航空发动机公司工艺规范体系中除采用大量的工业界规范外,企业也制定了不少工艺规范。GE 公司制定的企业工艺规范主要集中在 P 类规范,连同配套的规范共有 600 余项。P&W 公司制定的企业工艺规范共 700 余项,集中在 PWA 规范。GE、P&W 公司制定的企业工艺规范适用于其研制的各种机型,工艺规范格式与适航要求相一致,如包括了适用范围(Scope)、分类(Classification)、定义(Definition)、引用文件(Applicable Documents)、要求(Requirements)、质量保证(Quality Assurance Provision)、包装

(Packaging)、注释(Notes)等。GE、P&W 公司对工艺质量的验收要求均涵盖在各自的工艺规范或图纸中。

R·R 公司制定的企业工艺规范主要集中在 RPS、EPS 规范,共有 1300 余项,也适用于 R·R 生产的各种机型,与 GE、PW 相比,其工艺规范的格式未完全统一,但每份工艺规范基本包括范围(Scope)、定义(Definition)、引用标准(Referenced Specifications)、适用性(Applicability)、要求(Requirements)等。与 GE 公司不同的是,R·R 公司专门制定了关键零部件的工艺质量验收标准(RQSP、RQST、QCTP 等),这些标准涵盖了零部件制造过程涉及的各种工艺(机加工、焊接、喷丸等)的质量验收要求。从 2012 年开始,R·R 公司逐步对其工艺规范体系进行了进一步整合,按照适航要求统一了规范格式,并简化、优化了规范体系,原有的 RPS、EPS 规范统一过渡到 RRP 规范,后续新研制的发动机型号中都将采用新的规范体系。

综上所述,虽然 GE 和 R·R 公司的工艺规范体系框架存在差异性,但都具有通用性、综合性、动态性的特点。

**通用性:** 工艺规范适用于生产的各种机型。

**综合性:** 工艺规范均较全面地涵盖了某一项工艺的要求,包括人员要求、工装设备要求、工艺材料控制要求、工艺过程的控制要求、工艺质量的验证和检测要求等。

**动态性:** 不断修订工艺规范,使之满足先进性和适应性要求。如 GE 公司规定,应至少每 3 年修订一次工艺规范,修订时也会征集供应商对工艺规范的反馈信息,不断完善。

## 国内航空发动机工艺规范体系现状

国内航空发动机工艺规范体系

主要是在军机研制过程中发展起来的,并针对军机研制型号建立了自成体系的型号工艺规范,适用于特定军机型号,通用性不强。工艺规范体系按军机研制项目分工,主要采用了各主机厂的企业规范,也包括少量的国军标、航标等。企业工艺规范来源于不同渠道、不同时期、不同用途的规范。此外,各主机厂通过转包生产也获得了不少国外商用航空发动机的先进工艺规范,积累了相关的制造技术和管理经验,但仍未形成系统的、成套的工艺规范体系,特别在核心技术方面,由于国外发动机公司实行了严格的限制,关键工艺、先进工艺的规范还很缺乏。

商用航空发动机与军用发动机在研制目标、用途上不同,其性能、载荷、使用环境等方面与军用发动机有一定差异,商用航空发动机对安全性、可靠性要求更高,且必须通过适航审定,因而不能完全照搬军机的工艺规范体系。与国外先进航空发动机公司相比,国内的工艺规范体系还不完善,主要存在以下问题:

(1) 工艺规范体系不系统、不配套、不统一。由于多年来航空发动机工艺规范的国标、国军标、航标的编制计划渠道不同,造成有些工艺规范互相重复,甚至相互不协调。行业标准少,企业标准多;通用标准少,型号标准多;尤其在多流水制造模式下,不同制造供应商执行各自的企业标准,造成工艺规范多、乱、重。我国航空发动机工艺规范是随着航空发动机研制和生产的需要发展起来的,20 世纪 50~70 年代,主要按前苏联标准仿制发动机,并按前苏联航空发动机工艺规范体系制定我国航空发动机工艺规范。70 年代中后期以来,我国通过引进、转包生产等方式,接触到英、法、美国航空发动机工艺规范,同时结合国内情况,编制出一批具有英、美标准体系特点的航空发动机工艺规范。各主机厂结合厂内的

工艺条件,也编制了企业内部的工艺规范,应用于国内自行研制的军机型号。

(2) 缺乏某些先进工艺、关键工艺的控制和质量验收规范。如超塑成型/扩散连接、复合材料成型、摩擦焊、高温涂层、关键件机械加工等,由于前期的研究、技术攻关相对不足,规范制定所需的基础数据缺乏,相应的工艺规范尚未建立。

(3) 工艺规范内容不全面,缺乏可满足适航要求的工艺验证试验数据。某些工艺规范对工艺过程的一些重要环节缺乏明确要求,难于实现工艺过程的严格控制;某些工艺规范对质量验收要求过于简单,不利于保证工艺质量;某些工艺规范对质量检测方法要求不明确。国内工艺规范还存在工艺验证不充分、缺少完整数据支撑的问题,而商用航空发动机要满足适航要求,工艺规范必须要经过工艺验证并有完整的数据支持。

(4) 工艺规范的修订不及时。对工艺规范的修订未系统组织,也缺乏明确规定,某些先进工艺、先进技术在攻关并通过鉴定多年后仍未能纳入行业级以上标准,既不利于生产管理和产品质量控制,也不利于先进工艺技术的推广。工艺规范是工艺技术的总结和提炼,只有及时更新,才能促进工艺水平不断提高。但我国航空发动机工艺规范的复审和修订周期过长,有的工艺规范发布已 20 年仍未得以修订。另外,工艺规范实施中出现的问题未及时反馈,也使得工艺规范得不到及时修订。

(5) 工艺的配套标准不完善。目前航空发动机工艺的配套标准制定较少,影响了工艺的有效实施及工艺质量,如某些工艺规范中对工艺材料(包括辅助材料)缺乏配套的约束标准;某些工艺规范中对工艺质量的检测方法及验收要求缺乏配套的规定标准;一些新工艺、先进工艺的工艺质量验收要求尚待积累(如一些

新的涂层工艺还缺乏相关的验收图谱,给工艺实施带来困难)。

## 商用航空发动机工艺规范体系构建

### 1 构建思路及原则

构建商用航空发动机工艺规范体系是一项长期而复杂的系统工程,应以商用航空发动机研制项目为牵引,依托现有的技术基础、军机型号项目和技术攻关项目,充分汲取国际航空发动机先进和成熟的工艺技术规范,构建具有自主知识产权且适合国内基础工业现状的完整、协调、统一的商用航空发动机工艺规范体系,充分发挥标准化在航空发动机产业发展中的技术支撑作用,保障商用航空发动机项目研制。

工艺规范体系应遵循以下构建原则:

(1) 技术先进。工艺规范体系构建应采用先进、成熟的国际、国外标准,积极推行转包生产获得的已应用于国外商用航空发动机的工艺规范,为将来的适航认证奠定基础。

(2) 全面完整。工艺规范体系从内容上应满足适航的要求,全面地涵盖某一项工艺的要求,包括人员要求、工装设备要求、工艺材料控制要求、工艺过程的控制要求、工艺质量的验证和检测要求等。

(3) 体系通用。体系构建应综合考虑目前公司研制型号及后续产品发展的需求,以公司标准为基础构建涵盖当前型号及公司业务发展的一个体系,适用于公司研制生产的各种型号的发动机。

(4) 动态完善。工艺规范应以实用为原则,在实践中持续改进、不断完善;及时修订或制定相关规范,加大规范的宣贯执行力度,确保工艺规范的科学性、先进性和适用性。

### 2 实施途径

(1) 以项目的总设计师单位为主导,协调组织各方积极参与。

以项目的总设计师单位为主导,通过多方协调组织,融合各方优势,让相关单位积极参与标准体系的建设工作,发挥各单位在规范草拟、技术审查等方面的作用,加快工艺规范体系的制定和贯彻实施步伐。

(2) 夯实通用基础工艺规范。

工艺规范体系的建设工作量大、涉及面广,是一项长期工作,应首先夯实通用基础工艺规范。目前由于技术水平、装备、人员等方面不均衡,导致各企业的工艺规范的技术指标和相关要求差异很大。先从成熟度高、通用性强、应用面广的工艺(如热处理、化学处理、渗透检测、超声检测等)做起,分析比较 AMS、GJB、HB、型号及各企业的工艺规范后,整合优化出满足商用航空发动机产品质量及适航要求的通用基础工艺规范,为工艺规范体系构建奠定坚实基础。在此基础上,逐步开展其他工艺规范的整合优化工作。

(3) 重点突破关键零部件的工艺规范。

关键零部件(盘类、叶片类、轴类、机匣类等)的制造加工质量对发动机的性能有直接影响,应重点突破关键零部件相关的工艺规范,以关键零部件为核心,梳理研制所需的工艺种类,对涉及的不同企标、AMS、GJB、HB 等工艺规范进行分析,研究比较存在的差异,整合优化出具有先进性、国内适用性强的关键零部件用工艺规范。

(4) 结合应用研究工作,制定先进工艺、关键工艺的工艺规范。

工艺规范是核心技术和关键技术成果的固化和表现形式,应针对商用航空发动机研制项目需要的先进工艺、关键工艺,在工艺技术攻关项目中开展工艺规范的研究工作,安排工艺验证试验,并在后续研制过程中逐步完善,形成工艺规范。

### 3 措施和建议

在工艺规范体系构建的实施过

程中,还需要注意以下问题。

(1) 按适航要求制定工艺规范。

应按适航要求对工艺规范的格式、控制要求来编制工艺规范,并尽可能采用统计数据来证实工艺过程能力,建立满足适航要求的工艺规范编制、试验及验证机制。

(2) 尽可能采用相应的国际标准和国外商用航空发动机已使用的工艺规范。

应抓紧开展国内工艺规范与国际、国外先进工艺规范的对比分析研究,围绕商用航空发动机项目研制需求,结合国内实际情况,加快采用先进的、适用的国际、国外先进工艺规范,提升国内工艺规范技术水平。

(3) 知识产权问题。

工艺规范体系构建需要集结全行业的资源和能力,知识产权问题可能是工艺规范体系构建面临的主要障碍之一,应建立合作共赢的机制,充分调动发挥各参研单位的积极性,加强协作共同确立工艺规范。

## 结束语

工艺规范体系构建是商用航空发动机项目研制的重要工作内容。商用航空发动机研制项目对工艺规范体系提出了迫切需求,具有自主知识产权的商用航空发动机工艺规范体系是商用航空发动机研制的重要支撑,也是增强民机产业自主创新能力的必然要求,同时也作为商用航空发动机适航取证必要的支撑技术体系,也是核心竞争力的重要组成部分。

## 参考文献

- [1] STEFFENS K, WILHELM H. Next engine generation: materials, surface technology, manufacturing processes. What comes after 2000? [EB/OL]. 2000[2012-10-12]. <http://www.mtu.de>.
- [2] 毕国楹. 航空工业标准化基础. 北京: 航空工业出版社, 2002.
- [3] 张公绪, 孙静. 质量工程师手册. 北京: 企业管理出版社, 2002.

(责编 谷雨)