

商用航空发动机的特种工艺控制研究

Research on Special Process Control for Commercial Aircraft Engine

中航商用航空发动机有限责任公司 韩秀峰

[摘要] 说明了特种工艺控制对商用航空发动机产品质量的重要作用;阐述了商用航空发动机特种工艺控制的必要性;研究了国外航空发动机公司的特种工艺控制方法,并系统地介绍了特种工艺资格批准、工艺规程批准及批产控制的要求、流程和工具。

关键词: 商用航空发动机 特种工艺控制

[ABSTRACT] The importance of special process control for commercial aircraft engine product quality is outlined. The necessity of special process control for commercial aircraft engine manufacturing are presented. Western commercial aircraft engine OEM's special process control methods are summarized. The requirements, process and methods for special process qualification approval, procedures approval and lot production control are also presented.

Keywords: Commercial aircraft engine Special process control

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.S2.015

商用航空发动机要求高可靠性和长寿命,特种工艺是产品实现过程的关键环节,其工艺质量对发动机产品的安全性和可靠性有重要影响。特种工艺具有控制要素多、影响因素复杂、操作要求严格、工艺质量不易检测、失效后果难于估计的特点,对航空产品特种工艺必须采用一系列特殊手段来严格控制。局方在适航条令中也明确要求要对特种工艺进行控制,在型号合格审定过程中,局方对特种工艺的评审是一项重要内容,要求申请人对特种工艺进行了有效的控制,因此特种工艺的有效控制也是适航取证的必要条件。

1 特种工艺的定义

在美国军方 1959 年首次发布的 MIL-Q-9858A《质量大纲要求》(Quality Program Requirement)中就提出要对某些特殊的工艺(如化学的、冶金的、声学的、电子的、射线等)进行工艺控制,制定工艺控制标准,对于工艺环境及工艺的确证、检测、批准、监控,要进行特别的控制^[1]。目前,特种工艺较公认的定义为: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。

特种工艺所涵盖的范围在不断变化,国外航空发动机公司的特种工艺目录也不完全一样。基于经验的积累或认识的提高,某些原来认为是普通加工工艺的也可能被列为特种工艺,比如针对关键转动件的机械加工工艺,以前认为只需对加工完之后的尺寸特征进行检测就可以满足产品的质量要求,随着对表面完整性和抗疲劳制造技术的深入研究,发现机械加工对转动件的寿命影响很大,而这种影响难于通过常规的检测方法进行检测,因此,国外主要的航空发动机公司(如 GE、P&W、HONEYWELL 等)都将关键转动件的机械加工列为特种工艺。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 GE、P&W、R·R 为代表的飞机发动机制造商,在 2010 年将关键转动件的机械加工列为特种工艺认证范围。随着发动机性能要求的不断提高,新工艺、新技术也更多地应用于航空发动机制造,特种工艺所涵盖的范围也在不断增加,国外航空发动机公司的特种工艺目录中就已超过了 100 项。

2 特种工艺控制的必要性

特种工艺缺乏有效控制会对航空发动机的安全性造成重要影响,甚至可能危及人身安全。据美国 FAA 对航空发动机事故及其原因的统计分析发现,由于设计、使用或维护不当引起的事故已在逐渐减少,但由于制造缺陷造成的事故并没有相应减少,而且有增加的趋势,特别是在发动机的不包容事故中,特种工艺控制不当是造成事故的主要因素。美国宇航工业协会早在 1997 年的统计报告中就表明:在发动机转子出现裂纹或故障的情况下,大约 25% 都是由加工过程引起的^[2]。

一架 B767-200 飞机的 CF6-80A 发动机在飞行中高压涡轮一级盘发生破裂,调查发现,事故原因是采用电镀铬修复涡轮盘轴颈时产生了电弧,电弧击伤了涡轮盘的表面成为裂纹源。1996 年 7 月 6 日,美国 Delta 航空公司的一架 MD-88 客机在起飞时发生事故,机上的普惠 JT8D 引擎出现了故障,事故原因是由于风扇盘级间螺栓连接孔的开裂导致了盘的破裂飞出,在螺栓连接孔的加工过程中,可能由于刀具的划伤、金属屑的嵌入或冷却液的失效造成孔加工表层出现了热影响区和严重的晶粒变形,从而过早形成裂纹,造成风扇盘破裂^[3]。

对特种工艺进行控制也是商用航空发动机通过适航取证的要求,局方在型号合格审定中,对特种工艺的评审是一项重要内容,要确定申请人对特种工艺进行了有效的控制,并有证据表明工艺在生产过程中能够始终加工出符合型号设计的零件。局方对特种工艺评审的工作流程和内容是依据 AP21-03R3《型号合格审定程序》附录 B 中第 3.5 节的制造符合性检查时应考虑因素、第 6 节的工艺过程评审^[4]。局方在 AP21-03R4《型号合格审定程序》附表 20 型号检查报告中第 2.4 条也明确要求:是否已充分地控制了重要和/或关键零件的特种工艺(如喷丸处理、浸蚀等)以保证这些零件的制造符合批准资料的有关要求。

国外航空发动机公司都对特种工艺十分重视,对特种工艺进行深入研究,针对每项特种工艺的特点制定了详细的特种工艺控制要求,在公司内部成立了以特种工艺控制为主要职责的专家队伍和专业组织,建立了完善的特种工艺控制要求,制定了标准化、规范化的特种工艺控制流程,开发了专业化、数字化的辅助工具,并推动成立了全球性的专门针对航空航天业特种工艺认证的全球协作组织 NADCAP,以控制和持续提升特种工艺的工艺质量。目前,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,各主要的航空企业现都要求其供应商必须取得 NADCAP 认证。

3 特种工艺的控制方法

完善的工艺控制标准是开展特种工艺控制的前提条件,与之配套的流程、方法和工具是实施有效的特种工艺控制的重要手段。普通加工工艺产生的尺寸特征可以方便快捷地进行监视和测量,特种工艺的工艺控制方法与普通加工工艺不同,工艺质量难以通过后续的监视或测量验证,只能通过其他方法(如产品的破坏性检验)验证。因此,特种工艺的控制需对工艺参数及影响因素进行控制,并通过必要的破坏性试验来验证。

国外航空发动机公司建立了完善的特种工艺控制

要求,制定了全面的特种工艺控制流程。首先是对特种工艺资格进行批准,通过对特种工艺进行工艺审核,目的是全面评估特种工艺是否符合相关的工艺标准;其次是对特种工艺的工艺规程进行批准,目的是评估工艺规程(包括工艺参数)及工艺质量是否符合零件设计图的要求;最后是对批产中的特种工艺进行控制,目的是评估工艺质量的稳定性,保证可持续满足设计图和相关工艺标准要求。随着航空产业快速走向全球化,航空发动机整机制造商(Original Equipment Manufacturer, OEM),如 GE、R·R、P&W 公司将大部分的零部件甚至单元体的制造进行外包,对特种工艺的控制也随之延伸至其制造供应商。

对于航空发动机 OEM 来说,对特种工艺的控制要包括以下主要工作:

- (1) 制定特种工艺的控制要求,如工艺控制标准;
 - (2) 对供应商的特种工艺进行审核;
 - (3) 对工艺过程能力进行分析;
 - (4) 对工艺方法的控制:对工艺规程进行审批,对返工返修工艺程序进行审批;
 - (5) 对设备的控制:对工艺设备进行审批;
 - (6) 对材料的控制:对工艺材料进行规定,必要时指定供应商;
 - (7) 对测量的控制:对测量方法及要求进行规定;
 - (8) 对人员的控制:对工艺技术人员、操作人员及检验人员的熟练程度进行评估;
 - (9) 对环境的控制:对环境要求进行规定。
- 对于制造供应商来说,必须按照航空发动机 OEM 即客户的要求建立特种工艺的控制体系以保证:
- (1) 工艺规程及操作指导卡应经过批准;
 - (2) 工艺设备在使用前应经过批准;
 - (3) 当工艺标准有要求时,应对操作人员的技能进行确认;
 - (4) 返工返修工艺程序应经过批准;
 - (5) 实际操作按照批准的要求执行。

3.1 对特种工艺的资格批准

为了保证特种工艺可满足航空发动机公司制定的工艺标准要求,确保特种工艺得到有效的控制,国外航空发动机公司都只选用合格的特种工艺供应商,而合格的特种工艺供应商是通过定期对供应商的特种工艺进行工艺审核来确定其特种工艺资格。国外航空发动机公司对特种工艺资格批准要求不仅适用于关重件,也适用于一般零件。对于航空发动机公司的 OEM 来说,特种工艺资格批准是通过内审及 NADCAP 认证来进行控制;对于 OEM 的供应商,特种工艺资格还必须由 OEM 来批准,并要求其通过 NADCAP 认证。目前,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。一般来说,航空发动机公司对供应商进行首次审核,若审核通过后,后续的定期审核可借助 NADCAP 认证。NADCAP 制定了标准化的审核流程,如图 1 所示,包括前期的审核准备、现场审核和后续的审核问题反馈。

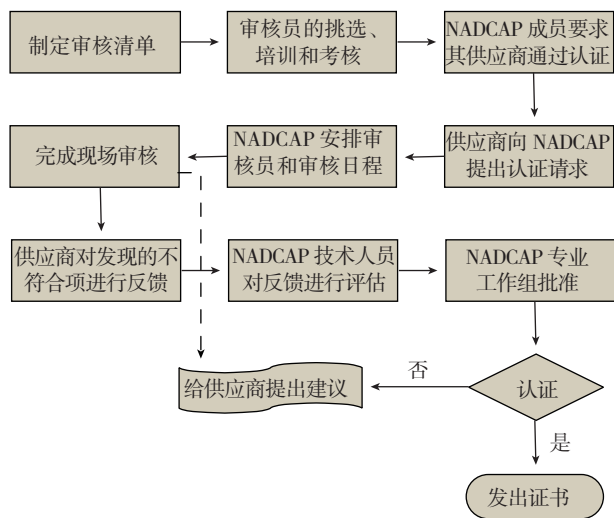


图1 NADCAP的特种工艺认证流程
Fig.1 NADCAP audit process

NADCAP 审核涵盖人、机、料、法、环、测等 6 个方面,并且要求审查现场实际加工的工艺过程,通过对供应商实际加工过程的审查,审核员可以全面、深入地了解供应商是否清楚地知道客户的要求(包括设计图、工艺标准),是否在内部程序、工艺规程和操作指导卡中准确、全面地体现客户要求,操作人员是否按照操作规程进行操作,是否能提供符合性的客观证据。NADCAP 特种工艺认证对审核员的要求很高,制定了一套严格的审核员的挑选、培训、考核办法,审核员都是在其专业领域内具有丰富经验的资深专家,对所审核的工艺非常精通。R·R 公司要求供应商通过 NADCAP 认证,其供应商每年的 NADCAP 认证超过 1000 项。GE 公司的供应商也要接受每年超过 2000 项的 NADCAP 认证,由 GE 公司进行的二方审核也超过了 1000 项。

审核清单是进行特种工艺审核的重要工具,为审核员提供了某项特种工艺的全面要求,使得特种工艺审核更标准化,多采用“是”或“非”问题形式直接提出要求,并给出确认的建议方法,要求提供客观证据,是对相关的工艺标准具体要求的明确,可有效地指导供应商进行特种工艺审核的准备工作。NADCAP 的审核清单一般包括:材料控制、设备、程序控制、工艺控制、人员、检验和验收、定期维护、工件审核。以电镀工艺的审核清单问题为例,如表 1 所示。

特种工艺审核中常发现的问题有:(1)工艺规程未

表1 电镀工艺审核清单(部分)

问题	结果 (是/否/不适用)
设备要求: 电镀工艺槽及漂洗槽的设置是否可使零件始终保持湿的表面状态? ·观察工件的电镀过程	
设备要求: 加热槽是否装有自动控温装置? ·对于不采用加热槽的工艺,此项要求不适用。 ·手动控温方式不可接受。	
工艺控制: 是否有程序文件规定电流密度、电压、电流、时间、槽液成分及浓度、温度及其他必要的工艺参数?	
槽液分析: 用于槽液分析的水,其电导率是否至少为 500000 Ω·cm (最大 2μS/cm)? ·核实容器标签或在线仪表的读数。	

经批准;(2)操作指导卡未经批准;(3)操作指导卡中的工艺参数与工艺规程或其他文件中要求不一致;(4)操作指导卡在内容上缺乏对操作人员的有效指导;(5)检验计划中缺乏工程图或工艺标准要求的检测项目;(6)操作人员未经认证;(7)工艺设备未经批准;(8)实际操作过程中,工艺参数超出操作指导卡规定的范围;(9)工艺更改未经批准;(10)返工或返修未经授权;(11)工艺材料未经有效控制,如焊丝的保存或使用易混淆。(12)对某些外委的特种工艺缺乏控制。

3.2 对特种工艺的工艺规程批准

工艺规程的批准是在取得了特种工艺的资格批准后,在首件鉴定前完成。国外航空发动机公司对供应商特种工艺的工艺规程批准要求一般针对关键件,在提供给供应商的首件批准要求中,对该零件制造过程中所涉及的特种工艺进行识别,对每项特种工艺的确认及工艺规程的批准提出具体的要求。

国外航空发动机公司对特种工艺的工艺规程批准过程实际上就是特种工艺的鉴定或确认的过程,国外的航空发动机公司一般称之为“工程来源批准”过程,工程来源批准(GE: Engineering Source Substantiation, R·R: Engineering Source Approval, P&W: Process Source Approval)是通过试验验证供应商制定的工艺规程是否满足设计要求的过 程。工程来源批准制度是由航空发动机公司的工程部门制定的,用于对零部件或原材料的制造过程进行控制,其中重点是针对特种工艺控制。

一般来说,工程来源批准针对较重要的零部件。例如,GE 公司要求的是盘、轴、机匣、叶片(包括静叶)、叶片保持环、齿轮、轴承、封严系统、控制系统及附件、燃烧室和涡轮部件中直接承受燃气冲刷的零部件等,需经工程来源批准的零部件约占发动机零件总数的 30%。对

表2 某项焊接工艺标准的特性要求分解(部分)

特性编号	特性要求	章节	特性分类	结果	测试方法/设备	
					首件	批产
1	接头装配间隙不超过 0.12mm	3.1.1	一般特性	0.06mm	塞尺	塞尺
2	焊缝及近缝区的颜色应与母材相近	4.2.2	一般特性	金属色	目视	目视
3	焊后错边不超过 0.25mm	4.2.3	一般特性	0.08mm	百分表	百分表
4	焊缝正面和背面余高均不超过 1.2mm	4.2.4	一般特性	0	机加焊缝	机加焊缝

这些零部件,在首次加工前或是发生工艺变更时都需要进行工程来源批准。

工艺变更定义为有可能改变零部件的质量、服役寿命、性能,或者可能对后续加工产生不利影响的工艺变动。典型的工艺变更有:加工设备出现更换、搬迁或大修,工序的调整,关键工艺参数的变动等。非工艺变更定义为工艺文件的编辑更改,不会改变零部件的物理、化学、电、冶金性能等。典型的非工艺更改有:工艺文件的勘误、澄清、对现有的尺寸范围或工艺参数范围的加严等。

工程来源批准应在代表性的试片、试验件或零件上进行,采用与真实零件加工相同的工艺设备、工艺程序和工艺参数,对加工完成后的试片、试验件或零件按具体的检测要求进行全面的检测。对于某些特种工艺或零部件,可能要求对多批次的试片、试验件或零件进行检测,以保证工艺的可靠性和稳定性。

国外航空发动机公司都建立了标准化、规范化的工艺规程批准流程。对于每项特种工艺,除了在工艺控制标准中明确规定对人员技能、设备能力、材料控制、工艺方法、质量检测及生产环境的要求外,针对某些重要的零部件特种工艺规程的批准,还根据每项特种工艺的特点专门制定工艺验证试验要求。在工艺验证试验要求中对采用的试验材料、检测项目(包括破坏性试验)、验收要求、试验数目及频次等进行规定;对于某些工艺,除了要求在某个设定的工艺参数点进行验证,还要求对工艺参数在一定的变动范围内的情形也进行验证,以验证工艺的稳健性;对于供应商提交的工艺规程和相关的检测报告也制定了明确的要求,规定了特种工艺的关键工艺参数,并要求供应商提供,如规定了电镀的关键工艺参数有:镀槽类型、槽液成分、槽液的 pH 值、槽液的温度、电流密度、镀层的退除及补镀程序、电镀时间、电镀电压、零件的清洗及活化程序、零件保护程序、镀层的后处理工艺(如除氢)。对于某些工艺,还制定了工艺规程的模板,以避免遗漏某些重要的工艺环节或工艺参数。

国外航空发动机公司在审批供应商的工艺规程时,除了对供应商提交工艺规程进行审核外,还要对提交的相关特种工艺确认记录、验证试验结果等进行审核。对

工艺规程的批准是基于符合设计图及其引用的工艺标准中的每项要求,并且符合工艺验证试验的要求,不允许有遗漏和错误,对审批人员的专业能力要求很高。国外某些航空发动机公司针对工艺规程的审批开发了数字化的辅助工具,以期望提高工艺规程的审批过程的标准化程度、减少失误,其实质是对工艺标准中的与产品直接相关的特性要求进行逐项分解,列出条目后逐条检查是否符合。特性要求是指尺寸、功能、材料、性能、外观及其他可测量或确认的用于判定是否符合设计要求的特征或性能。工艺标准中与产品不直接相关的要求不作为特性,如焊接工艺标准中对焊工的资格要求,表 2 为某项焊接工艺标准的特性要求分解。

与国外相比,国内对特种工艺的鉴定或确认的要求较为笼统,主要的依据是 GJB 467A《生产提供过程质量控制》中对特殊过程的控制和确认要求,由于缺乏明确的、细化的验证方法和要求,致使生产单位的理解难于统一,在特种工艺确认的实施过程中易出现特种工艺的识别不准确、特种工艺的确认不充分,对产品质量造成影响。

3.3 对批产中的特种工艺控制

工艺规程经批准后,工艺也随之被固化,批产中的特种工艺应严格按批准的工艺规程进行,确保特种工艺的工序和操作都完全一致,并要对工艺变更进行严格控制,一旦有工艺变更,须再次进行特种工艺确认,工艺规程也要再次经过审批。

除此之外,采用统计过程控制(Statistical Process Control, SPC)方法对批产中的特种工艺进行控制是国外航空发动机公司的普遍做法。统计过程控制是一种过程质量控制方法,在特种工艺的正常生产过程中采用统计过程控制,可对工艺质量的稳定性进行有效的分析和控制,有利于对未来的工艺质量做出预测性分析,达到保证与改进工艺质量的目的。

国外航空发动机公司对于某些特种工艺,甚至在其工艺标准中明确要求要求进行统计过程控制,以确保工艺过程能力的稳定性。

“控制图”是统计过程控制中常用的工具,通过利用“控制图”中点的分布对工艺的运行状态进行监控,

可迅速发现工艺过程中由特殊原因引起的变化。以CuNiIn涂层的喷涂工艺为例,标准要求的涂层结合强度为40MPa以上,通过对涂层的结合强度定期进行检测,得到统计数据如表3所示。

应用统计软件分析,生成控制图如图2所示,结合统计学的判稳法则和工艺经验,可判断工艺过程是否存在异常,对工艺过程进行预警。

表3 CuNiIn涂层结合强度(MPa)统计

子样号	结合强度 /MPa	子样号	结合强度 /MPa	子样号	结合强度 /MPa
1	42.7	12	47.1	23	46.0
2	43.8	13	51.2	24	47.6
3	48.3	14	52.1	25	49.9
4	47.5	15	54.5	26	49.3
5	58.1	16	55.8	27	52.6
6	52.7	17	50.5	28	44.7
7	50.1	18	43.1	29	48.1
8	47.1	19	47.7	30	46.5
9	49.1	20	46.4	31	51.8
10	53.9	21	49.9	32	53.7
11	49.8	22	53.3	33	50.4

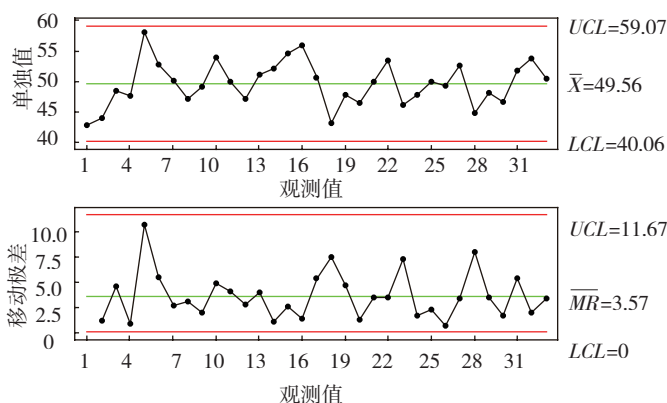


图2 CuNiIn涂层结合强度的控制图

Fig.2 Control chart for CuNiIn coating bonding strength

4 结束语

不论是制定特种工艺的控制要求,还是对特种工艺资格、对特种工艺的工艺规程及对特种工艺的批产控制方法进行审批,都需要较强的专业技能才能有效实施。国外航空发动机公司都建立了专业的特种工艺控制专业队伍,成立了专门的组织机构,对保证其产品制造质量发挥关键作用。与此同时,国外航空发动机公司建立了完善的特种工艺的控制方法,并推动成立了第三方特种工艺认证组织NADCAP,制定了标准化、规范化的特种工艺控制流程,开发了专业化、数字化的辅助工具。

特种工艺控制是商用航空发动机产品质量的重要保障,我国在商用航空发动机研制项目中可借鉴国外航空发动机公司的特种工艺控制方法,同时应加快形成特种工艺的技术管控能力,集聚特种工艺技术管控的专家队伍,才能有效提升特种工艺的控制能力,保证商用航空发动机的产品制造质量。国内主要的航空发动机制造厂通过与国际知名的航空发动机公司的转包合作项目,已按商用航空发动机的产品要求建立了较系统的特种工艺控制体系,为我国商用航空发动机研制项目奠定了基础。

参考文献

- [1] U.S. Department of Defense. MIL-Q-9858A quality program requirement //US Military Specification, 1959.
- [2] U.S. Federal Aviation Administration. Guidelines to minimize manufacturing induced anomalies in critical rotating parts. Washington, D.C.: Office of Aviation Research and Development, 2006.
- [3] U.S. National Transportation Safety Board. Uncontained engine failure, delta air lines flight 1288, aircraft accident report. Washington, DC.: National Transportation Safety Board, 1996.
- [4] 庄洪兴. 型号合格审定中的特种工艺评审. 中国民用航空, 2011 (4): 78-79.

(责编 玲犀)

(上接第14页)

参考文献

- [1] 马立, 刘梵, 胡培. PMI泡沫材料在航天器机构中应用的可行性研究. 航天器环境工程, 2010, 27(2):164-168.
- [2] 杨洋, 刘军, 卢鑫, 等. 固化压力对PMI泡沫/高温固化环氧碳纤维夹层复合材料胶接性能影响的研究. 高科技纤维与应用, 2012, 37(1):18-20.
- [3] 米星宇, 张广成, 张乐, 等. 硬质泡沫塑料耐热性测试方法研究. 工程塑料应用, 2012, 40(8):71-76.
- [4] 代文平, 李文晓. PMI泡沫的耐高温压缩蠕变性能. 玻璃钢/复合材料, 2014(11):71-76.
- [5] 高学礼, 孙林, 陈倩. GB/T 8813-2008 硬质泡沫塑料压缩性能的测定. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2008.
- [6] 施雅芳, 王永明, 李健军, 等. GB/T 1040.2-2006 塑料拉伸性能的测定 第2部分: 模塑和挤塑塑料的试验条件. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2006.
- [7] 周祝林, 王亚熊, 王彬如, 等. GB/T 1455-2005 夹层结构或芯子剪切性能试验方法. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2005.
- [8] 王立平, 严杰, 楼天地, 等. GJB 1585A-2004 聚氨酯硬质泡沫塑料力学性能试验方法. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2004.
- [9] 朱吴兰, 陈倩. GB/T 8811-2008 硬质泡沫塑料尺寸稳定性试验方法. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2008.
- [10] 曾新榕, 杨林, 陈倩. GB/T 15048-1994 硬质泡沫塑料压缩蠕变试验方法. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 1994.

(责编 大漠)