

技术成熟度评估 在航空材料开发中的应用

Application of Technology Readiness Assessment in Aeronautical Material Development

中国航空工业发展研究中心 陈亚莉



陈亚莉

中国航空工业发展研究中心研究员。长期从事航空材料情报研究工作，曾获先进国防科技情报工作者等称号。

材料是现代航空武器的物质基础和技术先导,对现代航空武器的研制成败具有重大的影响,因此它的技术成熟度等级的评估无论是材料本身的研制还是对相关产品开发都越来越显示出重要的作用。

“技术成熟度等级(TRL)” 的划分

“技术成熟度等级”的概念是

62 航空制造技术·2010年第14期

材料是现代航空武器的物质基础和技术先导,对现代航空武器的研制成败具有重大的影响,因此它的技术成熟度等级的评估无论是材料本身的研制还是对相关产品开发都越来越显示出重要的作用。

NASA 于 1989 年提出并用作评估的工具。起初这个成熟度为 7 级,1995 年修订为 9 级。2002 年被美国国防部纳入武器采办条例中,并在 2005 年正式定为 9 级。目前技术成熟度的概念已在国际上得到采用,例如加拿大以及日本等国。现在一个国际工作小组已试图提出国际技术成熟度的协议。同时,也派生出一些专门的技术成熟度等级,如“设计成熟度”、“材料成熟度”、“工艺成熟度”、“无损检测成熟度”以及“制造成熟度”等。作为 NASA 及美国国防部的技术成熟度的第 3 次修订是 NATO 的 10 级技术成熟度的出台,它是在 9 级之前加上一个 0 级技术成熟度。美国国防部强调制造在武器开发中的作用,制订了也是

10 级的“制造成熟度”,与 9 级技术成熟度并用,相互补充。

“技术成熟度”等级只是提供一种技术在转入武器系统中的技术成熟性以及应用风险的一种通用语言和通用标准,因此必然留下大量的问题有待回答。需要进一步细化,由此产生了“xRL”成熟度,称为子系统成熟度。例如,复合材料的纤维、树脂、预浸料工艺、工具、固化以及后固化等步骤。

技术成熟度等级、制造成熟度等级与武器开发的关系见图 1。1~4 级成熟度为第一阶段,在该阶段内提出武器解决方案并进行分析;5~6 级成

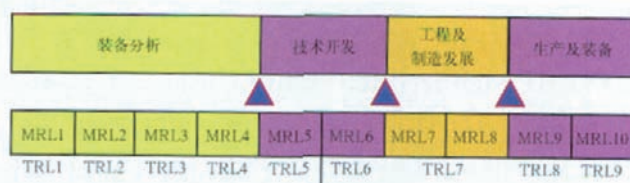


图1 技术成熟度与武器研制的关系

熟度等级为第二阶段,与武器装备的技术开发相对应,在实验室内进行组件的验证评估,从第7级成熟度进入产品的工程及制造开发计划;经8~9级成熟度,进入生产及服役。

1~2级成熟度的材料尚属于基础研究阶段,一般在大学进行研究。3~6级转入研究所实验室研究,评估是否可转入武器系统。在美国,武器用1~2级成熟度的材料由AFOSR(美国空军科学研究办公室)负责资助提交给大学开展基础研究,3~4级成熟度的材料由AFOSR负责转移到AFRL(美国空军实验室)或DARPA的实验室开展应用基础研究,6级以上将提供给武器装备计划中进行工程开发。在法国,1~2级成熟度的工作也是在大学开展,EADS负责3级成熟度的概念验证工作,4级以上由空客的各公司实施。一般6级以上才能进入产品开发。

材料技术成熟度与产品技术成熟度之间的关系

航空材料的成熟度与产品的成熟度有着密切的关系,也就是说,材料的开发是面向产品的,只有实现了材料与发动机研发的密切互动,才能协调技术、投资以及研制周期,以取得良好的经济及技术效益。

表1为材料技术与产品研发阶段的对应关系。其中,TRL3为材料技术可行性研究结束阶段,TRL6为技术验证阶段结束,TRL9为技术成熟阶段。在投资方面,TRL3大约需100万美元,TRL6和TRL9分别增加1个数量级,材料供应商的投资可达到1亿美元。1台发动机成本约需10~20亿美元,TRL6与TRL9之间一般为2~3年,TRL3与TRL6之间一般少于1年。

理想的安排是材料的9级(TRL9)与发动机的6级(TRL6)对应,这样可让发动机的TRL6~TRL9之间缩短为24个月。材料开发与发

表1 材料与发动机技术成熟度之间的关系

	TRL3 (技术可行性)	TRL6 (技术验证)	TRL9 (技术成熟)	
材料	·实验室初步评估 ·关键性能评估	·小规模验证; ·制造零部件(按初步规范); ·供应商评估	·确定能力; ·建立生产规范; ·确定供应商; ·收集性能数据	
发动机		TRL3 (发动机可行性)	TRL6 (演示验证)	TRL9 (成熟)
		·计算机模拟; ·概念的缩比件验证; ·性能估算	·全尺寸试验; ·产品性能验证; ·成熟技术	·生产设计零件; ·发动机验证; ·进入服役

动机开发应互动交流信息,其目的是保证确定出适当的试验验证、设计技术的开发及工程制造以及检测方法。

根据经验,一种材料如果不以客户需求为导向,材料开发与产品开发在成熟度上不匹配,研制周期将长达10年。反之,加强供需双方的联系,可缩短到2~3年。

“技术成熟度等级”的评估(TRA)方法

尽管美国国防部的技术成熟度等级得到广泛的认同和使用,但只根据技术成熟度的定义,往往不能明确地标定技术成熟度的等级,还有待对技术成熟度进行细化,方能更具体地

表2 DARPA的低成本复合材料计划内容

项目名称	目标	现状
电子束固化	验证成本效益以及在飞机结构上的适用性	进入第一阶段末期,电子束固化件的验证
低成本一体化结构技术(IATA)	验证设计/工艺在一体化结构上的可行性以及胶接装配	第一阶段完成,减重33%,成本降低65%
快速RTM工装	用快速原型件技术来降低RTM工装的成本及周期并对工件进行验证	选F117检查口盖及RAH-66传动支承销验证
感应加热	验证在固化及连接上的效益	已完成,准备写报告
低成本工装	验证低成本工装用在非热压罐固化及热压罐固化中	开发了工装,非热压罐固化材料完成性能表征
胶接技术	开发及验证成本效益以及热塑性焊接及热固性胶接飞机结构的可行性	计划已完成
精密装配	装配成本高的原因以及降低的验证	找出成本高的原因,重点解决厚度不均问题
丝束铺放机能力验证	验证最新铺放机的能力,提出使用指南,确定改进项目	已完成
低成本复合材料铺放技术(RAPTECH)	开发热塑性复合材料原位铺放技术及在飞机结构上应用的可行性	已制出验证结构件用壁板
低成本复合材料在推进装置上的应用	利用RTM设计推进装置零部件,制订丝束铺放工艺并验证其低成本特性	广泛应用RTM,丝束铺放技术已成熟

表3 材料技术成熟度等级的定义

技术成熟度等级	成熟度等级的定义
1~2	<ul style="list-style-type: none"> ·无材料供应,有待开发; ·未制成复杂部件; ·无试验数据
3~4	<ul style="list-style-type: none"> ·材料性能无重复性; ·试验不全; ·未制成缩比件及全尺寸部件; ·全尺寸部件无成本模型验证
5~7	<ul style="list-style-type: none"> ·数据有限且误差大; ·制成了缩比件,但试验未完成; ·制成全尺寸部件,但未进行设计载荷试验; ·未完成成本模型验证
8~10	<ul style="list-style-type: none"> ·材料及工艺经良好表征; ·有不同条件下充实的数据库; ·缩比件及全尺寸部件具有重复性,但未进行载荷试验; ·成本模型经验证

进行评价。本文拟根据国外所做的一些评估案例进行相关分析。

1 案例 1: 技术成熟度在 DARPA 的“低成本复合材料”项目评估中的应用

技术成熟度的评估在 DARPA 的“低成本复合材料”项目中的应用是一个典型例子(表 2)。与每一个 DARPA 项目一样,对该项目给出了技术成熟度等级,如表 3 所示。

表 3 中所列的成熟度等级是根据所占有的信息量及已有的经验确定的。1~2 级表明在材料表征、试验以及缩比件(形状较平板复杂并比试样大)以及全尺寸件开发的各方面的技术均缺少。3~4 级成熟度表明只生产了试样,有必要进行试验并用较大的部件对材料进行验证。5~7 级表明成本模型有待验证。同时也需用全尺寸及缩比件进行试验来验证成本模型。8~10 级表明有小的不足,但技术足够成熟可用于生产。

要评估“低成本复合材料”计划各项的技术成熟度,还必须识别影响成熟度的一些因子。由于

该计划是面向军用航空的,选用了 J.W.Lincoln 在飞机结构技术从实验室转入全尺寸开发时所需识别的 5 个因子,包括稳定的材料及其工艺、可生产性、经表征的力学性能、结构性能的可预测性以及结构保障性(可维修性及可检测性),同时加上材料可供应性、取得认证的设计及成本分析、质量保证程序的开发以及经验证的经济可承受性。将这些因子归并整理得出 8 个影响成熟度的因子,分别为:

- 有可以应用的、经表征的材料;
- 稳定的材料及工艺;
- 制造出几何复杂形状的实验室缩比件;
- 寿命预测模型以及适于部件及缩比件的力学性能;
- 设计及成本对比分析得到认可,并开发出质量保证程序;
- 全尺寸部件的可生产性以及试验;

·结构可维修性以及可检测性(保障性);

·经过验证的经济可承受性。

表 4 所列为 DARPA 的低成本复合材料计划中的各项目技术成熟度等级评估的汇总表。该表给出 DARPA 低成本复合材料各项目的技术成熟度的评审结果。从表中所列成熟度的等级可以看出该项目中有 3 项技术仍不成熟,分别是电子束固化、热固性复合材料胶接技术以及 IATA(低成本一体化机体技术),其中某些成熟度因子的等级在 1~2 范围内。低温固化工艺的等级也低,原因是该工艺是新近开展的,评估时收集到的信息不够多。

电子束固化、胶接技术以及 IATA 的进步不快,部分原因归咎于 DARPA 的资助决策。但技术问题也是影响原因。对于电子束固化技术,在开展缩比件试验之前本就应该开发出来合适的树脂材料,但在项目开

表4 DARPA低成本复合材料技术计划的技术成熟度评估 (TRA)

项目	成熟度因子							
	A	B	C	D	E	F	G	H
电子束固化	1	1	4	1	2	2	2	2
IATA	4	4	7	2	4	2	2	2
固化成形工艺	8	8	8	8	8	8	7	7
快速 RTM	7	8	7	8	7	8	3	7
感应加热(热塑性复合材料)	7	7	4	4	4	2	2	3
低成本工装								
—工具	7	6	7	6	7	8	5	6
—低温固化材料	2	3	2	2	3	2	2	2
胶接技术(热固性复合材料)	2	2	4	2	2	2	2	3
精密组装	4	3	4	5	5	2	3	5
丝束铺放机改型及技术路线图	9	9	9	8	8	8	8	8
快速铺放技术(热塑性复合材料)	7	7	2	4	4	1	3	1
风扇整流罩门	9	9	9	8	8	8	8	9
风扇包容环	8	8	8	7	7	6	5	4
风扇出口机匣	8	8	8	8	6	6	5	8
风扇进气机匣	8	8	8	7	6	8	5	5
风扇叶片	8	6	8	7	5	7	5	5

始前尚未获得该树脂。胶接项目表明,热固性树脂仍可进行感应加热,但不具备航空质量要求。在电子束固化项目中,虽然生产了一个大的构件,但未试验其是否满足设计要求。

对热塑性复合材料感应加热、精密装配等项目, DARPA 的资助决策有中等影响,但仅取得一些进展。热塑性复合材料项目,丝束铺放的成本模型表明可节约 33%,但未对全尺寸部件进行验证。材料及工艺经过了加热表征,但未制出缩比件或全尺寸部件来验证成本模型。在精密装配项目中,只为一种材料开发了材料变异性数据库,但未指出这些数据能否用于其他材料系统。

具有较高技术成熟度等级的有快速 RTM、工装项目,但未完成全尺寸试验。尽管未进行风扇出口机匣及风扇叶片的全尺寸试验,但制造了 7 个风扇出口机匣,并显示出成本低于传统方法。未完成成本模型验证的还有风扇进口机匣、风扇叶片和快速 RTM。风扇进气机匣满足轻量化要求,但不满足经济性要求。

最成熟的技术是固化成形工艺、丝束铺放机能力验证,以及风扇整流舱门。这些技术只有一些小缺陷。固化成形设计指南将转入 F-16 及洛·马公司的生产中。丝束铺放的技术成熟度达到 8 级或更高,是 DARPA 项目中最成熟的技术。不过这种技术已成熟多年,用在多项飞机生产中。该项技术将继续发展成为航空工业更广泛应用、风险更低的工具。

在 DARPA 的项目中,有 2 个成熟度因子即保障性及经济可承受性的等级范围仅达到低到中级,在这些项目中,对于维修及检验未加以充分重视,因此无可靠的试验方法及修理工艺,复合材料应用将受到限制。可靠性及经济可承受性的验证要用全尺寸验证件进行验证。一些部件将在 JSF 的发动机验证试验中进行。若无全尺寸数据,即使成本低、可提

高系统性能,仍属于不成熟,会带来高度风险。

评估后分析工作表明,虽然大部分项目受到 DARPA 的资助决策的影响,所有项目将在其重新修订计划中完成可行性验证。

在所有项目中,丝束铺放机能力验证、固化成形工艺以及风扇整流罩门的等级最高,将转入工程应用项目。风扇叶片以及风扇进气机匣将在 JSF 项目中继续改进,以达到更高的等级。精密装配、电子束固化以及丝束铺放技术在其他项目中得到支持,存在的问题是资金是否足以使等级得到明显提升。具有成本降低潜力的、仍不成熟的,但得到支持的有感应加热、IATA、低成本工装、风扇出口机匣以及风扇包容环。

从以上案例分析可以看出,对于技术类项目,如果技术成熟度因子为 1~2 级的有 1/2 以上,则视为不成熟。对于产品类项目,如果技术成熟度影响因子有一个小于 5 即视为不成熟。对于成熟度影响因子 8 以上超过 1/2 的技术类及产品类项目,均可视为足够成熟,其余视为中等成熟。

2 案例 2: 技术成熟度在材料无损检测技术评估中的应用

技术成熟度在材料无损检测技术评估上的应用是另 1 个例子。NASA 的无损检验工作小组用 9 级技术成熟度对各种无损检测技术进行了评估。评估结果见表 5。

表中所列“传统”及“先进”方法的区别是在信息处理中是否采用计算机数字技术。例如传统的热成像技术系指用红外照相机取得的图像,而先进的热成像是用先进的计

表5 各种无损检测技术成熟度评估结果汇总表

无损检测技术	基本金属结构(a)	基本复合材料结构(b)	复杂金属结构(c)	复杂复合材料结构(d)
传统热成像	9	—	—	—
先进热成像	9	9	4	4
传统超声	9	—	—	—
先进超声	9	9	3	3
传统 X 射线	9	9	—	—
反向几何 X 射线	6	5	4	3
CT	9	9	9	6
背散射 X 射线	5	—	—	—
传统涡流	9	—	—	—
先进涡流	9	—	4	3
激光位错摄影	6	4	3	3
微波	3	4	3	3
传统声发射	9	6	—	—
先进声发射	9	6	3	3
目视	9	—	—	—
渗透检验(表面缺陷)	9	—	9	—
磁粉检验(表面缺陷)	9	—	9	—
原位监控	—	—	3	3

注:(a)平面,小曲率;(b)平面,小曲率;(c)不规则,曲面、混杂结构、蜂窝、内组装结构;(d)曲面、混杂结构、胶接、蜂窝、内组装结构。

算机软件来分析结构红外辐射图像并提供结构的热迁移或扩散系数图。而结构的热扩散系数在确定损伤程度方面比相应的温度分布更可靠。

除了 NASA 的无损检测组的技术成熟度评估外,作为二级评估标准,有的公司也制定了无损检测技术评估等级标准,如美国 Aerospace 公司标准,它只分 6 级。1 级—已识别潜在的无损检测方法;2 级—方法已经验证;3 级—已选择出能识别的缺陷及无损检测方向;4 级—已识别并验证了方法论;5 级—已验证了标准化;6 级—检验方法已建立,并验证结果有重复性,对检验有信心。

(责编 良辰)