

商用大涵道比发动机复合材料风扇叶片应用现状与展望

Present Conditions and Development of Composite Fan Blades of High Bypass Ratio Commercial Jet Engines

中航工业复合材料技术中心先进复合材料国防科技重点实验室 刘 强 赵 龙 黄 峰

[摘要] 复合材料风扇叶片已成为商用大涵道比发动机的发展趋势,复合材料风扇叶片已应用于 B777、B787 等多个民机型号,并即将在 C919、A320neo、A350、B737MAX、B777-X 等先进机型上应用,复合材料风扇叶片的成型技术已呈现出自动化、多样化和高效化的趋势。

关键词: 复合材料 风扇叶片 发动机 模压 RTM

[ABSTRACT] Composites fan blades has become the development trend of high bypass ratio commercial jet engines. Composites fan blades has been used in Boeing 777, 787 and other civil aircrafts, and will be applied on C919, A320neo, A350, B737MAX, B777-X and other advanced airplanes. Automation, diversification and high efficiency become the direction of composites fan blades manufacturing technology.

Keywords: Composites Fan blade Engine Molding RTM

进入 21 世纪以来,随着 A380、B787 等大型商用飞机的使用,大飞机的研制越来越受到世界各国的重视,并逐渐成为国家综合国力的象征。大涵道比涡扇发动机是大型飞机的核心部分,是决定大型飞机研制能否成功的关键。复合材料具有金属材料无法比拟的低密度、高比强度和比刚度,为了达到发动机的高推重比、低耗油率、低噪声、低维修成本的需要,世界各主要发动机厂商都在大力推广复合材料在大涵道比涡扇发动机上的使用。

风扇叶片是现代商用飞机发动机最重要的部件之一,据统计,风扇段质量约占发动机总质量的 30%~35%,降低风扇段质量是降低发动机质量和提高发动机效率的关键手段,采用更大、更轻的风扇叶片已成为发动机的发展趋势。风扇叶片每减重 1kg,风扇机匣和传动系统也相应减少 1kg,同时发动机结构和飞机的机翼 / 机身结构也分别减重 0.5kg,这种由于风扇结构减重带来的叠代效应对飞机的减重非常重要。此外,大涵道比涡扇发动机的主要推力来自流经外涵道的冷空气,要满足较大的涵道比,必须采用较大尺寸的风扇。因此,采用复合材料风扇叶片是实

现发动机更高涵道比和减重的唯一途径^[1-3]。

与钛合金叶片相比,复合材料风扇叶片具有重量轻、高效率、低噪声的特点,叶片数少,具有更优异的抗颤震性能和损伤容限能力,抗鸟撞性能也能满足适航需求。以同时为波音 787 飞机开发的 GENx 发动机和 TRENT1000 发动机为例,采用复合材料风扇叶片的 GENx 发动机叶片数更少,质量更轻,燃油效率更高,如图 1 所示。

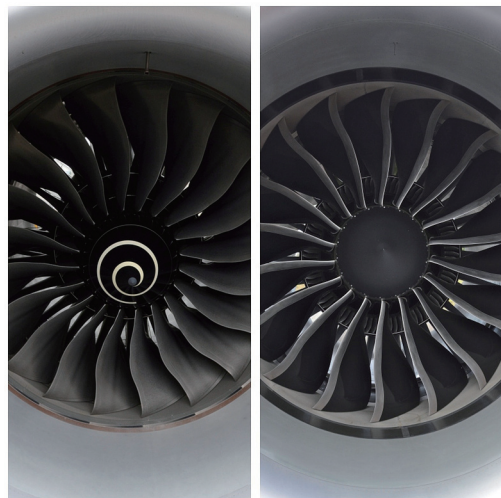


图1 TRENT1000钛合金风扇叶片(左)对比GENx复合材料风扇叶片(右)

Fig.1 TRENT1000 Titanic Alloy fan blade vs. GENx Composites fan blade

1 复合材料风扇叶片在商用涡扇发动机上的应用现状

目前,国外已进行商业化应用的复合材料风扇叶片的主要代表为 B777 配套的 GE90 系列发动机及为 B787 配套的 GENx 发动机;即将进行商用化应用的复合材料风扇叶片的代表为中国商飞 C919、美国波音公司 B737max、欧洲空中客车 A320neo 配套的 LEAP-X 发动机及为 B787-9、A350 配套的 TRENT1000、TRENT-XWB 等发动机。

其中,GE90、GENx、TRENT1000、TRENT-XWB 发动机具有较大的推力,主要为双通道商用客机提供飞行动力,风扇叶片尺寸较大。而最新开发的 LEAP-X 发动机推力

较小,主要为单通道商用客机提供飞行动力,因此风扇叶片的尺寸也小于 GE90、GENx 等发动机的风扇叶片。

值得注意的是,国外最先采用复合材料风扇叶片的并不是匹配单通道客机的具有较小直径风扇叶片的商用涡扇发动机(如 CFM56、V2500 等),而是匹配 B777 级别双通道客机的具有较大直径风扇叶片的 GE90 商用涡扇发动机。其原因为:较小尺寸风扇叶片的刚性过强而无法产生足够的弹性变形,通过预浸料叠层/模压成型工艺研制的小尺寸全复合材料风扇叶片在当时无法通过抗外物冲击试验(简称 FOD 试验);而较大尺寸的风扇叶片能够产生足够的弹性变形吸收冲击能量,同时结合边缘缝合技术及钛合金包边技术,抑制冲击带来的边缘分层,最终通过了 FOD 试验得到了商业化应用。直到 2012 年,采用 3D-WOVEN 编织结构/RTM 工艺成型的 LEAP-X 发动机复合材料风扇叶片问世才解决了这个技术问题。

因此,从制造技术上可对以上发动机复合材料风扇叶片加以区分:其中 GE90、GENx、TRENT1000 及 TRENT-XWB 发动机复合材料风扇叶片采用了预浸料/模压技术成型,可归为第 2~第 3 代复合材料风扇叶片制造技术;而 LEAP-X 发动机复合材料风扇叶片采用了 3D-WOVEN/RTM 技术成型,可归为第 4 代复合材料风扇叶片制造技术。

1.1 预浸料/模压成型复合材料风扇叶片

采用预浸料/模压成型复合材料风扇叶片的代表主要有美国 GE 公司的 GE90、GENx 发动机复合材料风扇叶片及罗·罗公司和 GKN 公司正在联合为 TRENT 系列发动机开发的复合材料风扇叶片。

(1)GE90 复合材料风扇叶片。GE90 是美国 GE 公司于 20 世纪 90 年代为双发大型客机 B777 开发的特大流量比、特大推力的涡扇发动机,是国外最早采用复合材料风扇叶片设计的商业化发动机之一,见图 2。



图2 GE90发动机复合材料风扇叶片
Fig.2 Composites fan blades of GE90

该叶片采用了预浸料/模压成型的掠形大流量宽弦复合材料结构,综合考虑了空气动力学、航空力学、低周

疲劳循环和高周疲劳循环等因素。GE90 的复合材料风扇叶片高 1.219m,叶根宽 0.304m,弦长 0.61m,风扇转子 $\phi 3242\text{mm}$,风扇叶尖速度为 360~390m/s。该叶片由 400 层 IM7/8551-7 的碳纤维/增韧环氧预浸料制成,其外形从叶根至叶尖逐渐减薄。在叶身的压力面上,涂有聚氨酯防腐涂层,叶背上涂有一般的聚氨酯涂层,为了提高叶片的抗鸟撞能力,在前缘增加了钛合金包边;为了避免在工作中出现复合材料的分层,在叶尖和后缘处采用了 Kevlar 纤维进行缝合。叶片根部为三角形燕尾形榫头,榫头承受压力的表面上涂有低摩擦系数的耐磨材料。

GE90 采用了 22 片复合材料风扇叶片的总质量为 349kg,约占发动机总质量的 8%,与钛合金空心叶片相比,质量轻 66%,强度提高 100%。经过十余年的运行,GE90 复合材料发动机叶片已累计飞行 1000 万 h 以上,仅有 3 片复合材料风扇叶片被更换,GE90 发动机的成功应用,证明了复合材料风扇叶片适用于具有严格要求的商业飞行的需要^[4-5]。

(2)GENx 复合材料风扇叶片。GENx 发动机是美国 GE 公司 2002 年为 B787 和 B747-8 等飞机开发的新一代涡扇发动机,在材料和模压成型工艺不变的情况下,优化了 GE90 的复合材料叶片结构设计,见图 3。

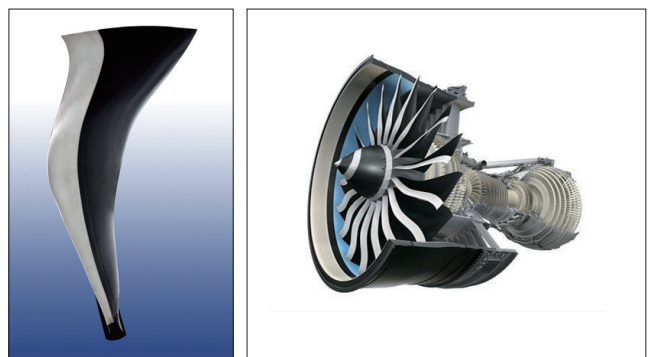


图3 GENx发动机复合材料风扇叶片
Fig.3 Composites fan blades of GENx

GENx 发动机风扇叶片采用了 GE 公司的第 3 代复合材料,外形(掠形)基本同于 GE90-115B 发动机,采用新一代三元流技术设计,叶片数由 GE90 的 22 片减为 18 片,减轻了质量。叶片的前缘与尖部采用了钛合金护套。在叶片榫根处,采用了特氟隆耐磨衬垫,因而叶片装进燕尾槽中后无需加润滑剂,正常的维护仅需要目视检查^[6-7]。

(3)罗·罗公司复合材料风扇叶片。随着复合材料风扇叶片技术的不断进步,英国罗·罗公司目前正在将目光从在其涡扇发动机上长期应用的钛合金空心风扇叶片移开,转而研制碳纤维增强复合材料风扇叶片。该公司与吉凯恩集团(GKN)一起开发一种跟钛合金叶片一样薄的碳纤维风扇叶片试验件,见图 4,并满足在鲁棒性、制造成本

以及产量可扩缩性等其他方面的标准。这种碳纤维风扇叶片已经完成了包括叶片飞出、鸟撞试验在内的地面试验,并即将于2013年第2季度在TRENT1000发动机上开始飞行测试,并可望在2020年前应用于TRENT-XWB之后的下一型新发动机^[8]。

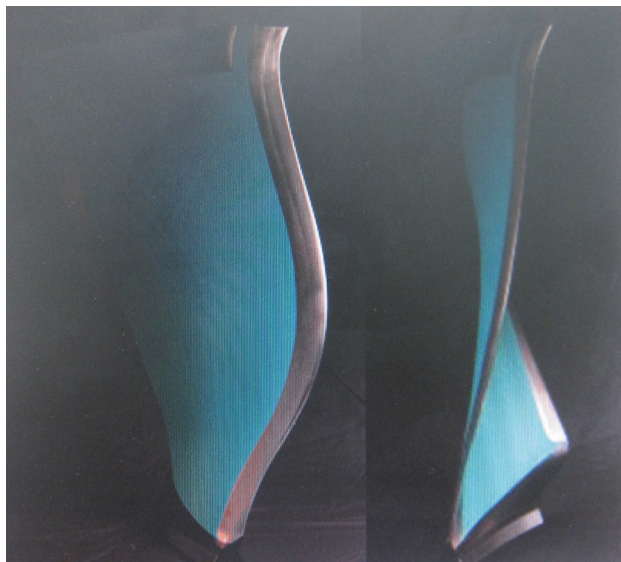


图4 罗·罗公司和GKN公司研发的复合材料风扇叶片
Fig.4 Composites fan blade developed by Rolls-Royce and GKN

1.2 3D WOVEN/RTM 成型复合材料风扇叶片

由于中等推力发动机对更小、更轻的风扇叶片提出了更高的强度要求,作为GE公司在CFM国际公司的合伙人,Snecma公司将采用新的碳纤维增强复合材料结构制造工艺用于CFM56系列的下一代继任发动机——LEAP-X。

与GE90和GENx风扇叶片采用铺设多层预浸碳纤维薄层的方式不同,Snecma公司采用树脂传递模塑成型(RTM)工艺来制造LEAP发动机的风扇叶片,其中在树脂注入和叶片高压成型前将碳纤维编制成3-D WOVEN结构,见图5。



图5 LEAP-X发动机复合材料风扇叶片
Fig.5 Composites fan blades of LEAP-X

LEAP-X发动机风扇叶片采用了法国Snecma公司的专利3-D WOVEN/RTM技术成型,也是世界上首个通过FOD试验的中小推力涡扇发动机复合材料风扇叶片。Snecma公司为该复合材料风扇叶片申请了数个专利,主要包含3-D WOVEN预制体编织技术、3-D WOVEN复合材料叶片预成型技术、RTM成型技术、预制体切割技术等。在制造方面,Snecma公司委托Albany Engineered Composites(简称AEC公司)完成三维编织预制体的制备和整个复合材料风扇叶片的制造,由于自动化程度高,叶片制造的全过程仅需24h即可完成^[9]。

与CFM公司同等推力水平的采用更多金属结构的CFM56发动机相比,采用3-D WOVEN/RTM技术成型的LEAP发动机重量降低了1000磅(1磅≈0.45kg)以上,燃油效率提高16%,NOX排放量低60%,噪声水平低10~15dB,而可靠性维持CFM56的水平。与同样采用复合材料风扇叶片设计的GE90发动机相比,3-D WOVEN/RTM成型的发动机叶盘直径减少了50inch(1inch=2.54cm)以上,但具有与之相当的抗鸟撞能力。

目前,LEAP-X发动机已被中国商飞C919、B737max、A320neo这3种双发单通道旅客机选中。LEAP-X全尺寸整机试验将于2013初进行,随后将进行飞行试验,计划于2016年取得适航证。

2 复合材料风扇叶片核心制造技术

复合材料风扇叶片的核心制造技术主要包括预制体制备技术、高韧性材料体系和成型技术等。

2.1 复合材料风扇叶片预制体制备技术

预制体制备技术是复合材料风扇叶片制造的核心技术之一。根据发动机的推力和适用性的不同,国外采用了2种不同的复合材料风扇叶片预制体制备技术。其中适用于B777、B787、A350等双通道客机且具有较大推力和较大叶盘直径的GE90、GENx、TRENT1000和TRENT-XWB涡扇发动机风扇叶片预制体使用了IM7/8551-7及IM7/M91预浸料并利用激光定位手工/自动化成型技术制备;而最新开发的适用于B737、A320、C919等单通道客机,具有较小推力的LEAP-X涡扇发动机风扇叶片预制体采用了预浸渍IM7碳纤维和3D-WOVEN/RTM自动化技术成型。

根据相关资料显示,GKN公司在GE90发动机风扇叶片研制过程中开发了自动化丝束铺放设备(简称AFP)以帮助GE90复合材料风扇叶片预制体实现自动化成型,由于当时技术成熟度的问题,最终GE公司未采用AFP技术进行风扇叶片预制体的制造,而仍然采用激光定位辅助+手工铺叠的技术;而随着AFP技术的进步,罗·罗公司在研制TRENT系列发动机复合材料风扇叶片中采用了

GKN 公司的新型 AFP 自动化纤维束铺放设备,实现了复合材料风扇叶片预制体的自动化成型,并采用了超声刀进行了预制体切割^[8]。

在 LEAP-X 发动机风扇叶片成型过程中, Snecma 公司首次提出了无余量预制体成型技术、预制体预变形技术以及高度自动化的预制体制备技术。

Snecma 公司 3DW/RTM 成型风扇叶片预制体主要的技术优点有:(1)全三维编织结构的预制体,叶片的顶部可以更薄,根部可以更厚,这种设计降低了传统二维风扇叶片的分层缺陷产生的可能性;(2)采用了经纱连续的变截面成型技术,较经纱中断的三维编织结构具有更好的承载能力;(3)针对涡扇发动机叶片受力环境优化的三维编织结构;(4)采用了预浸渍的纤维束编织,维型性更佳;(5)在预制体中增加了可视定位线设计,可对三维预制体编织、预成型、预压实、合模等全程进行外形尺寸跟踪;(6)预制体编织完成后采用高压水设备无余量一次切割到位。

2.2 复合材料风扇叶片高韧性材料体系

国外适用于复合材料风扇叶片材料体系见表 1。

从表 1 可知,国外复合材料风扇叶片的增强材料均选用了 T800 级碳纤维,基体树脂选择了环氧树脂体系。其中, GE 公司选用了 Hexcel 公司的 IM7/8551-7 预浸料,而罗·罗公司选用了 Hexcel 公司的可适用于 AFP 技术的 IM7/M91 预浸料。由于风扇叶片的使用温度不高,高

温环氧树脂即可满足其使用温度要求,材料的主要性能指标为高韧性和湿热环境的性能保持率。在考核材料韧性的关键指标开孔压缩性能及冲击后压缩强度(CAI)上, IM7/8551-7 的开孔压缩强度可达 290MPa (常温干态), 255MPa (82℃湿态),性能保持率达 88%; IM7/M91 的开孔压缩强度为 315MPa (常温干态), CAI 值更高达 350MPa, 以上数据表明材料的高韧性和高性能保持率是复合材料风扇叶片材料的关键技术指标要求。由于 Snecma 公司未公布 3D-WOVEN 材料的相关性能,故无法从数据上进行直观对比判断。但从国外公开的相关资料可知,采用 3D-WOVEN/RTM 成型的复合材料风扇叶片通过了与 GE90 同级别的抗鸟撞试验(8 磅鸟撞)。考虑在相同冲击能量下小尺寸叶片需要更高的抗损伤容限能力和韧性需求,可以推测采用 Snecma 公司采用 3D-WOVEN/RTM 成型的复合材料相关韧性性能不亚于甚至超过 IM7/8551-7 及 IM7/M91 预浸料的韧性性能。

2.3 复合材料风扇叶片成型技术

国外目前主流的复合材料风扇叶片成型技术主要包含模压及 RTM 注射成型,分别对应的发动机及机型见表 2。

从表 2 可知,根据发动机的推力和适用性的不同,国外采用了两种不同的复合材料风扇叶片成型技术。虽然技术上有所区别,但模压及 RTM 技术(可等效为液体模压

表1 国外复合材料风扇叶片材料体系汇总

发动机型号	GE90	GE _n x	TRENT1000 及 TRENT-XWB	LEAP-X
制造厂商	GE	GE	罗·罗及 GKN	Snecma
材料类型	预浸料	预浸料	预浸料	预浸渍丝束
材料供应商	Hexcel	Hexcel	Hexcel	未知
材料体系	IM7/8551-7	IM7/8551-7	IM7/M91	IM7 丝束 /PR520
使用温度 /℃	室温 (RT)~93	RT~93	未标注	未知
玻璃化转变温度(T _g)/℃	157	157	185~190	未知
增韧形式	材料增韧	材料增韧	材料增韧	材料增韧 + 三维增强结构
增强纤维类型	T800 级碳纤维	T800 级碳纤维	T800 级碳纤维	T800 级碳纤维
树脂体系	环氧树脂	环氧树脂	环氧树脂	环氧树脂

表2 国外复合材料风扇叶片成型技术汇总

发动机型号	GE90	GE _n x	TRENT1000 及 TRENT-XWB	LEAP-X
制造厂商	GE	GE	罗·罗及 GKN	Snecma
对应机型	B777 系列	B787 系列	B787、A350	C919、B737MAX、A320neo
客机类型	双通道	双通道	双通道	单通道
成型方法	模压	模压	模压	RTM
模具材料	金属 / 复材	金属 / 复材	金属	金属
钛合金包边成型技术	数控加工	数控加工	未知	未知
钛合金包边与风扇叶片成型技术	3M 公司的 AF191 胶进行粘结	3M 公司的 AF191 胶进行粘结	未知	粘接,胶牌号未知
粘接形式	叶片固化后粘接	叶片固化后粘接	叶片固化后粘接	与叶片预制体粘接后整体成型

技术)可统称为复合材料闭模成型技术。由于涡扇发动机风扇叶片双曲面、大扭转、变截面的结构形式极为复杂,采用常规的热压罐成型技术无法充分保证成型后零件的尺寸精度,而闭模成型技术可实现零件高精度成型,同时零件的质量一致性好的特点刚好能够满足涡扇发动机对风扇叶片极高的质量要求。故闭模成型技术已成为复合材料风扇叶片的最主流成型技术,如 GKN 公司模压成型罗·罗公司的叶片以及 Snecma 公司利用 RTM 工艺制造 LEAP-X 发动机叶片。

随着技术的发展和进步,国外出现了采用复合材料材质的模具替代金属成型模具的趋势,其优点为采用复合材料材质加工制造的模具的热膨胀系数与复合材料零件的热膨胀系数基本一致,成型的零件具有更高的尺寸精度。如 GE90-94、GE90-115B、GENx-1B、GENx-2B 复合材料风扇叶片均采用了 HEXCEL 公司的 HexTOOL[®]M61 制造了复合材料材质的模具替代了金属模具,见图 6。

根据国外相关报道,LEAP-X 发动机的生产厂商 CFM (Snecma 与 GE 公司共同控股公司)也准备选用 HEXCEL 公司的 HexTOOL[®] 材料进行模具的加工。



图6 风扇叶复合材料质成型模具
Fig.6 Composites press mold

在钛合金包边成型技术方面,GE 公司直接采用了数控机床加工的方式进行了 GE90、GENx 复合材料风扇叶片钛合金包边的加工。

此外,大量的模拟技术也应用于复合材料风扇叶片的成型技术中,如法国 ESI-ATE 集团针对模压技术和 RTM 技术分别开发了 PAM-FORM 及 PAM-RTM 模拟软件,可采用计算机仿真的手段模拟在模压成型工艺中的预制体纤维角度的变化以及对最终零件的变形影响,也可在 RTM 工艺中模拟纤维渗透率、树脂流动、固化速率等多个工艺参数的变化对零件最终成型质量的影响。合理采用模拟技术可以在成型工艺技术研究的前期对成型技术进行方向性的指导,降低成本、缩短研制周期、规避研制风险。

3 结束语

随着技术的进步,复合材料风扇叶片已经被越来越多的商用发动机所采用,而制造过程的自动化、高效率,材料的高性能,成型工艺的高精度、高可靠性和一致性是复合

材料风扇叶片制造技术的发展方向。随着我国自主设计的大型民用客机 C919 开始研发,其对商用发动机的需求为我国的复合材料风扇叶片制造技术的发展提供了良好的机遇,虽然我国的复合材料风扇叶片制造技术尚处于技术积累阶段,但终有一天,我国的商用大飞机终能采用自主研发的涡扇发动机飞上蓝天。

参考文献

- [1] The GENx Theatre. General Electric [EB/OL].2007[2014-04].<http://www.geaviation.com/education/theatre/genx/>.
- [2] Chris R.Aviation Outlook:Composites in commercial aircraft jet engines.High Performance Composites,2008(9):63-94.
- [3] 李杰.GE 复合材料风扇叶片的发展和工艺.航空发动机,2008,34(4):54-56.
- [4] Aono H .Development of GE90 Engine with Largest Thrust. Ishikawajima-Harima Engineering Review ,1994,34(3):161-166.
- [5] Yonetani G .The history of the ETOPS and the airline's approach.Aviation Technology,2002,12:23-29.
- [6] Mecham M. GENx development emphasizes composites, combustor technology. Aviation Week [EB/OL].2007[2014-04].http://www.aviationweek.com/aw/jsp_includes/articlePrint.jsp?storyID=news/aw041706p1.xml&headLine=GENx%20Development%20Emphasizes%20Composites,%20Combustor%20Technology.
- [7] Paiste D.GENx—a new generation of jet engines.Union Leader [EB/OL].2011-10-23[2014-04].<http://www.unionleader.com/article/20111023/NEWS02/710239963>.
- [8] Portsmouth A. Composite Fan Systems.GKN AEROSPACE [EB/OL].2013[2014-04].www.gkn.com.
- [9] Rochester M. Snecma N H and partner AEC create resin-transfer engine blade process. Aviation Week & Space Technology,2012,9:74-77.

(责编 亿霖)

(上接第 57 页)

电常数保持不变,介质损耗角正切的变化也非常小^[2],且聚酰亚胺树脂具有低介电常数和较低的介质损耗,两者复合后获得了明显的性能优势^[3]。石英玻纤布/BMP350 复合材料具有优良的介电性能,可作为宽频高透波材料广泛使用于航空、航天等领域。

3 结论

石英玻纤布增强 BMP350 聚酰亚胺树脂基复合材料具有稳定的热物理性能、优良的综合力学性能和优良的电性能,可作为高透波材料在 320℃ 下使用。

参考文献

- [1] 刘强,王晓亮,蒋蔚,等.BMP 系列热固性聚酰亚胺树脂基复合材料的应用进展.航空制造技术,2009(s):22-24.
- [2] 赵伟栋,王磊,董波等.PMR 型聚酰亚胺树脂基复合材料研究及应用.航宇材料工艺,2009,4:1-5.
- [3] 张雄,王义,程海峰,等.石英纤维透波复合材料的研究进展.材料导报,2012,5(26):96-100.

(责编 谷雨)