

Z-pin 自动植入数控系统研制及性能研究*

Study on Open Control System for Automation Process of Z-pin Implanting

湖州师范学院 刘 林
南京航空航天大学 肖 军 李 勇 谭勇刚

[摘要] 为实现 Z-pin 的数控自动植入,以可编程多轴控制器 PMAC 作为运动控制的核心、附卡控制辅助开关量,设计了基于开放式数控系统的 X-cor 芯材成型专用 CNC 硬件体系。试制了多种规格的 X-cor 夹层结构试样,分别研究了 Pin 直径、Pin 植入角以及 Pin 分布密度等参数对 X-cor 夹层结构压缩性能、剪切性能的影响。结果表明,Pin 可以大幅度提高 X-cor 夹层结构的压缩性能,同时提高了断裂韧性。

关键词: Z-pin 自动植入 开放式控制系统 运动开关联动

[ABSTRACT] To realize the automation process for pin implanting of X-cor sandwich structure, a hardware architecture of CNC based on open control system is proposed in which a Programmable Multi-axes Controller (PMAC) is adopted as the key unit for motion control and the accessory card for on-off control. Several kinds of X-cor sandwich samples are made to study the influence of X-cor's parameters which include pin's angle, pin's diameter and pin's distribution on its compression property and shear property. The results show that pin can significantly enhance X-cor's compression property and failure energy.

Keywords: Z-pin Automated implanting Open CNC system Motion control and on-off control

复合材料夹层结构具有比强度、比刚度高的特点,适于现代工业,尤其是对于高强度、高模量和超轻材料需求高的航空和高速列车等领域。夹层结构主要有软木夹层、蜂窝夹层、泡沫夹层等三大类,蜂窝夹层结构制造方法较为繁琐,面板在蜂窝芯孔处极易产生缺陷^[1],一旦出现微裂纹进水且不易排出,导致胶层吸水降解,蜂窝夹层复合材料结构脱胶之后维修也十分困难^[2]。为解决蜂窝夹层复合材料的自身缺陷问题,Carstensen^[3]等提出了一种新的增强型泡沫夹层复合材料——X-cor。

目前,国际上被认为最有前景的新一代轻质超强韧

性材料是空间点阵夹层结构,而 X-cor 夹层结构属于此类结构,如图 1 所示,将单向复合材料针(即 Pin)以一定角植入泡沫中以形成三维桁架增强的芯材结构。X-cor 夹层结构的有以下几个突出优点^[3-8]:(1)夹层结构中的复合材料面板与嵌入面板的 Pin 直接共同固化,面板成型时无需胶膜,既可简化工艺又能提高强度,同时还降低了重量;(2)Pin 所成型的三维桁架具有较高的结构效率;(3)由于 Pin 的植入角度和植入密度均可设计,泡沫夹层结构具有更多的设计自由度,易实现局部高承载及最优化设计。



图1 X-cor夹层结构
Fig.1 X-cor sandwich structure

X-cor 增强泡沫芯材制备技术是 X-cor 夹层结构制造的关键技术之一,需研制 Pin 植入泡沫相关的自动化设备。南京航空航天大学复合材料自动化工程研究中心(NUAAACCM)依据 X-cor 芯材结构手工制备的工艺方法,自主开发了一套五轴 Z-pin 自动植入机及控制系统,大幅提高了 X-cor 夹层结构芯材制备工艺的精度及效率。

1 X-cor 芯材制备工艺原理

X-cor 芯材制备工艺技术的核心是 Pin 的植入技术,通过在泡沫塑料板上打孔、植入 Pin 并贯穿泡沫塑料板,从而完成这种新型夹芯结构中芯材的制作。

为提高 Pin 的植入效率并同时确保 Pin 植入角精度,设计并制造了 5 轴 Z-pin 数控自动植入机,如图 2。

Z-pin 数控植入机的工作过程如下:植入头定位和调整姿态;将 Pin 植入泡沫中;将 Pin 切断;植入头移动一个步长,重复植入。如此循环,完成 Pin 的植入。

* 军品配套项目(JPPT-1146)资助。

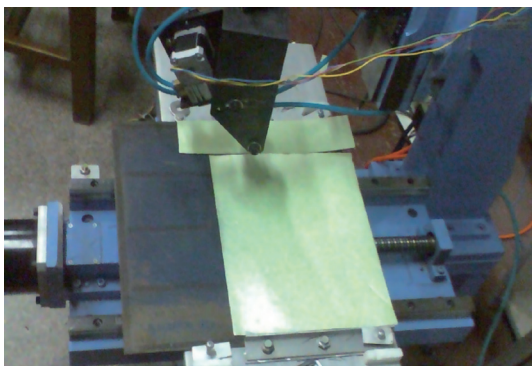


图2 Z-pin数控自动植入机
Fig.2 Z-pin CNC implanting machine

2 Z-pin 自动植入机及其控制系统

为满足工艺需求, Z-pin 植入机由三轴数控定位平台与专用的 Pin 植入头组成:(1)除了标准数控机床 XYZ 三坐标定位以外,增加了沿 X 轴向摆动的 A 轴,可实现精确的植入角度调整,3 轴联动可满足 Pin 植入的运动定位;(2)而 Pin 植入头核心包括 Pin 输送轴 C 及 Pin 切割装置,输送轴 C 完成 Pin 的传送与植入泡沫工艺,而切割装置则完成 Pin 的切断操作。

2.1 Z-pin 自动植入机控制系统硬件结构

Pin 的植入工艺特性决定了 Z-pin 植入机数控系统的硬件结构体系。如图 3 所示, Z-pin 植入机采用开放式数控体系结构,硬件主要包括工业控制计算机(IPC)、运动控制卡(PMAC)、开关量扩展板卡(ACC-1P, ACC-2P)、I/O 接口、步进电机驱动器和电源装置组成。

工控机(IPC)作为数控系统的主体,负责系统控制的信息处理和后台操作;并向下位机发出指令,协调运动量与开关动作的联合控制。运动控制卡 PMAC 接收

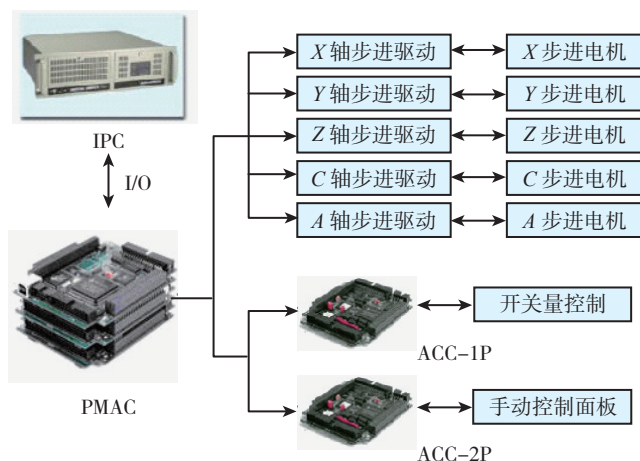


图3 X-cor自动植入机控制系统硬件结构
Fig.3 Hardware system of X-cor CNC implanting machine

上位机的加工指令,并驱动各轴电机以实现数控加工。本系统采用美国 DELTA TAU 公司专门开发的可编程多轴控制器 PMAC (Program mable Multi-axis Controller) 作为运动控制主体,PMAC 所采用的 CPU 是 Motorola 公司的 DSP56001/ 56002 数字信号处理器(40MHz),可以同时控制 8 个运动轴同步实现联动。除了能够执行运动程序外,还可监控 PLC 后台程序的运行状况。

本系统所选用的 PMAC II 型卡,通过扩展板卡(ACC-1P, ACC-2P)可与步进电机驱动器及开关驱动单元直接相连,以同时实现对步进电机与开关动作量的联动控制。系统采用时基控制模式,将 Z-pin 植入机的运动量与开关动作同步执行,两者的实时性及数据传输效率得以保证。本系统所选用的是日本步进电机与电磁阀开关,PMAC 与上位机通讯采用 ISA 总线方式。

2.2 Z-pin 自动植入机控制系统软件

2.2.1 Z-pin 自动植入机控制系统软件结构

Z-pin 植入机数控系统软件是一个多任务的实时软件系统,按照加工过程中任务的触发频率,数控软件主要可分为实时控制任务和系统管理任务两大类:实时控制任务为直接与植入工艺相关的任务,除此之外的为系统管理任务。如图 4 所示,实时控制任务包含加工解释程序、插补运动控制、伺服驱动控制、系统监控模块。系统管理任务包括参数初始化设置、故障诊断、用户界面及通讯程序。

实时控制任务中的加工程序解释模块是指解释程

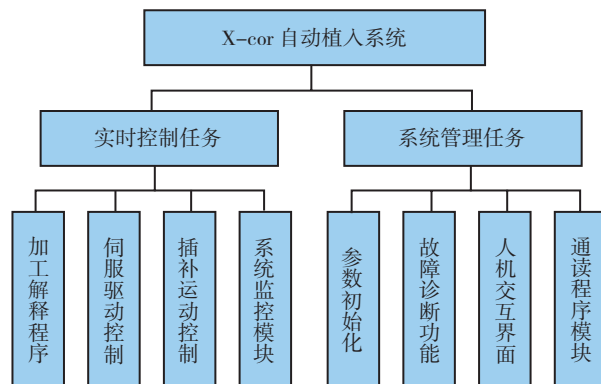


图4 X-cor植入机数控系统的软件结构
Fig.4 Software system of X-cor NC implanting machine

序对导入文件进行编译生成 PMAC 执行语言,确认后下载到 PMAC 卡上执行;伺服驱动模块完成对 PID 位置环伺服滤波器种类的选择,并设置其控制参数,以实现对各运动轴的精确定位;插补模块可分为直线插补、圆弧插补及样条插补等 3 种;监控模块利用 PLC 程序实施不断的对 PMAC 内存变量进行扫描,采集系统相关数据,以达到监控系统的输入及输出的目的。

而系统管理软件中初始化参数设置模块通过调用附件 PEWIN32 执行软件实现对 PMAC 参数设置和 PID 调整,并可实现对电机的手动控制及监控各输出轴位置及运动速度状态等;故障诊断模块主要为系统提供一种辅助判断方法,可增加系统的易维护性;用户界面主要用来完成人机交互,即指用户命令输入及系统指令输出,用户命令输入包括 CAD/CAM 文件的导入、控制命令的发出、系统参数的配置等;而系统输出则包括各种数据实时反馈及动态仿真等。通信程序模块实现了上位工控机(IPC)通过总线与下位机(PMAC)运动控制器之间的数据交换。

2.2.2 运动控制和开关量控制的联动实现

Z-pin 植入工艺的特殊性要求在于 Pin 植入过程中机器定位以及 Pin 植入等运动控制与 Pin 剪切动作控制交替进行,这两者都是关键任务,必须作为实时任务来实现。但他们隶属不同的控制方式,要实现两者的协调联动,必须将运动控制任务与开关量控制任务时基统一。采用 PMAC 为 CPU 执行核心, X-cor 植入机的运动量控制由 PMAC 主卡与附卡 ACC-1P 完成,而动作量则由附卡 ACC-2P 协调联动。

由于在 PMAC 运动程序中可以联合执行 PLC 逻辑控制指令,通过实时读取 PMAC 存储器中开关量的信息,并将其输入到扩展板卡 ACC-2P 中,即可保证在 X-cor 植入运动与辅助开关动作的联动实现。数据传送完全由 PMAC 核心的 CPU 协调实现。图 5 程序代码实现了在 PMAC 卡中运动控制与开关动作的数据交互。

如图 5 所示,在 PMAC 卡的运动程序中,执行 X、Y 轴运动过程中,通过对 M1 变量进行赋值,即可实时改变动作量,再通过 PMAC 后台的 PLC 程序,将其写入动作控制器 ACC-2P 中,将 M1 的值转换成开关量信号输出到电磁阀中,实现开关动作。

2.2.3 系统定位精度与联动控制的实时性

```

X ( P11 ) Y ( P22 ) ; XY axis positioning
While ( P22 < P200 ) ; boundary condition
INC
U ( P30 ) ; Pin implanting
ABS
DWELL500 ; pause for 0.5 second
M1=1 ; cutter down
DWELL1000 ; pause for 1.0 second
M1=0 ; cutter up
DWELL500 ; pause for 1.0 second
P22=P22+P20
Y ( P22 ) ; move to the next position
EndWhile ; for implanting
    
```

图5 PMAC程序及CNC代码示例
Fig.5 PMAC program and CNC code example

系统精度与实时性主要由运动控制卡 PMAC 与及扩展卡 ACC-1P、ACC-2P 来控制。在 PMAC 卡中,最

基本的运动量单位是脉冲,经系统传动比例折算, Z-pin 植入机的 X、Y、Z 等 3 轴运动 1mm 所对应的 PMAC 卡输出的脉冲数为 800 至 1250,由此可知系统的运动精度控制在 0.8-1.25 μm 之间;而在 PMAC 中后台 PLC 控制程序运行周期在 1ms 以内。因为所有控制板卡都是以 PMAC 核心 CPU 为时基控制基础的,所以运动量与动作量控制的实时扫描周期统一,动作量的延时精度也得以保证。

3 软件界面与内部数据输送

本数控系统的软件界面是在 Borland C++ 6.0 Builder (BCB) 的编程环境中开发的, BCB 被广泛应用于工控系统的研发,具有开发效率高,任务处理的实时性强的特点。软件平台采用面向对象技术(OOP),可以实现真正的模块化编程。图 6 为 X-cor 自动植入系统的软件界面。

X-cor 植入机数控系统是在主从 CPU 模式下将多

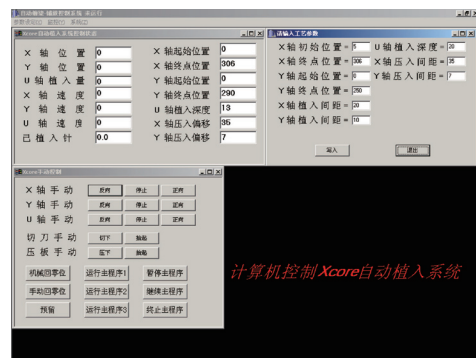


图6 X-cor植入系统软件界面
Fig.6 Software interface for X-cor implanting system

块板卡集成一体的,对于不同的功能模块,都要有相应的驱动程序与主应用程序通讯。应用 DELTA TAU 公司所提供的动态链接库,便可在控制系统界面中实现上位机与各下位机之间的交互通信。运用 Open_Pmac_Device()、Get_Pmac_Variable()、Pmac_Send_Command() 等命令可以实现开启 PMAC 卡,读取卡内参数,发送指令等操作,如图 7 所示。

4 典型试验验证

首台 Z-pin 自动植入机的研制成功,标志着复合材料泡沫夹层结构自动化制造进程的开始。为验证自动植入的工艺精度及制造效率,本文试制了几类典型结构件,并进行了性能测试。

4.1 试样规格

为研究 X-cor 泡沫夹层结构中 Pin 的植入角度及 Pin 的直径对压缩性能影响,本文设计并制作了 5 组不

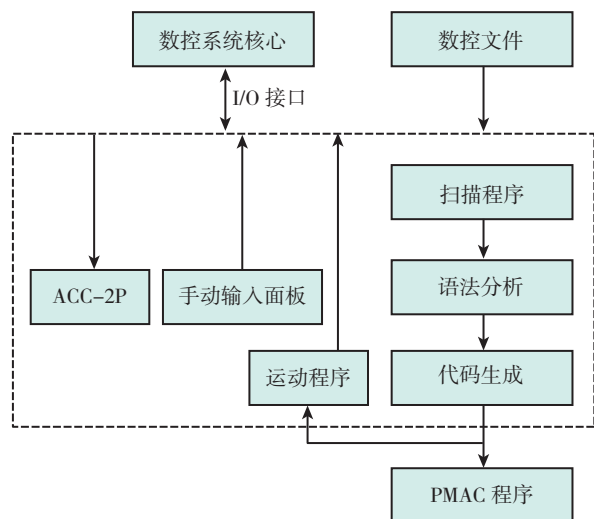


图7 控制系统数据流程图

Fig.7 Data flow chart of NC system

同规格的 X-cor 泡沫夹层结构样品及一组无 Pin 的空白泡沫夹层结构作为辅助对比,式样参数如表 1 所示。

采用 Pin 直径为 0.5mm 的 4 组样品用于研究在植入角度不同的情况下,对 X-cor 夹层结构压缩性能的影响;并试制了植入角度为 90° 的两组样品,用于研究 Pin 直径的改变对 X-cor 夹层结构的压缩性能影响。

4.2 试验结果及分析

表1 X-cor泡沫夹层样品规格参数表

Pin 植入角度 / (°)	Pin 直径 / mm	Pin 行间距 /mm × 列间距 /mm	Pin 体积分数 /%	夹层密度 / (kg·m ³)
60	0.5	5 × 10	0.453	38.8
68	0.5	5 × 10	0.423	38.3
75	0.5	5 × 10	0.406	38.1
90	0.5	5 × 10	0.393	37.9
90	0.7	5 × 10	0.769	43.5
blank				32.0

X-cor 夹层结构用于检测压缩性能的试验装置分为两部分,上端采用固定加载的平板,下端选用自适应球面平板加载,可确保载荷与试样表面保持垂直关系,如图 8 所示。对于 X-cor 夹层结构试样,试样边缘处的 Pin 会在切割过程中被切断,但试验结果中所检测的 Pin 体积百分数 V_{pin} 仍为试样中未切断的 Pin (上下两端均与面板结合) 体积百分数。

X-cor 夹层结构强度可按公式(1)计算,压缩模量可按公式(2)计算。

$$\sigma_c = \frac{P_{max}}{A}, \quad (1)$$

式中: σ_c 为试样压缩强度, MPa; P_{max} 为破坏载荷, N; A 为样品的横截面积, mm²。



图8 X-cor泡沫夹层平面压缩性能检测装置

Fig.8 Horizontal compression experimental device of X-cor sandwich structure

$$E_c = \frac{\Delta P \times h}{\Delta h \times A}, \quad (2)$$

式中: E_c 为试样压缩模量, MPa; h 为试样厚度, mm; ΔP 为载荷位移曲线上直线段载荷增量值, N; Δh 为对应与 ΔP 的压缩变形增量值, mm。X-cor 夹层结构的压缩性能试验数据如表 2 所示。

经分析,不同规格试样所制成的 X-cor 夹层结构,

表2 X-cor泡沫夹层压缩性能测试结果

Pin 植入角度 / (°)	Pin 直径 / mm	Pin 有效体积分数 / %	压缩强度		压缩模量	
			平均值 / MPa	离散系数 / %	平均值 / MPa	离散系数 / %
60	0.5	0.425	0.92	4.0	77.6	10.2
68	0.5	0.422	1.05	5.6	93.1	9.9
75	0.5	0.386	1.30	11.4	106.4	6.2
90	0.5	0.388	1.47	11.8	118.9	11.2
90	0.7	0.776	2.89	14.1	141.5	11.4
			0.38	3.0	16.7	2.0

其典型的压缩载荷位移曲线如图 9 所示。与没有 Pin 的空白泡沫夹层结构相比,随着植入角的增大 X-cor 夹层结构的压缩强度及模量均有大幅度的提高,同时 Pin 的分布密度有所减小,且失效之后的 X-cor 夹层结构,残余压缩强度也远高于空白泡沫夹层的强度。这是由于 X-cor 夹层结构中的 Pin 在被破坏之后,即使在泡沫中滑行也可产生较大摩擦阻力,Pin 在断裂后二次接触面板将对失效的 X-cor 泡沫夹层产生一定的增强效果。

5 结束语

本文针对 X-cor 植入机系统的设计难点,进行了数控系统硬件及软件结构的设计,采用 PMAC 及其附卡 ACC-1P、ACC-2P 分别作为运动量与动作量的控制

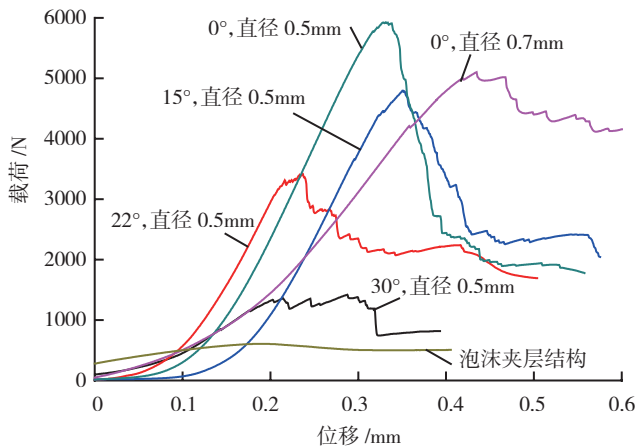


图9 X-cor夹层结构的压缩载荷-位移曲线图

Fig.9 Typical compression load-displacement curve of X-cor sandwich structure

单元,很好的解决了多轴联合运动的精度,以及运动动作联动协调性等问题。以 WinXP 作为系统控制的核心平台,在 BCB 环境下编写了 X-cor 自动植入机应用软件系统,确保了数控加工关键任务的实时效率。实现了 X-cor 自动植入机的基本功能,并初步研究了 Pin 直径、Pin 植入角以及 Pin 分布密度等参数对 X-cor 夹层结构压缩性能的影响。结果表明,Pin 可以大幅度提高 X-cor 夹层结构的压缩性能,同时提高断裂韧性。

参考文献

- [1] 黄涛. 缝纫泡沫夹层复合材料力学性能研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
- [2] 杜龙. X-cor 夹层复合材料力学性能研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [3] Carstensen T, Cournoyer D, Kunkel E, Magee C. X-Cor advanced sandwich core material[R]. //Proceedings of the 33rd international SAMPE technical conference, Seattle, WA, November 2001.
- [4] O'Brien K T, Paris I L. Exploratory investigation of failure mechanisms in transition regions between solid laminates and X-Core truss sandwich. Compos Struct 2002, 57: 189-204.
- [5] Vaidya U K, Kamath M V, Hosur M V, et al. Low velocity and compression-after-impact response of pin-reinforced sandwich composites. Am Soc Mech Engrs, Mater Div (Publ) MD 1999, 86:1-10.
- [6] Cartie' D D, Fleck N A. The effect of pin reinforcement upon the through-thickness compressive strength of foam-cored sandwich panels. Composites Science and Technology, 63 (2003): 2401-2409.
- [7] Marasco A I, Cartie D D R, Partridge I K, et al. Mechanical properties balance in novel Z-pinned sandwich panels: Out-of-plane properties. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 37, Issue 2, February 2006: 295-302.
- [8] Kalidindi S R, Abusafieh A, El-Danaf E. Accurate characterisation of machine compliance for simple compression testing. Exp Mech 1997, 5-210.

(责编 可岚)

(上接第 71 页)

定。这样不仅可以避免目前大量的重复工作和浪费,而且对于材料的快速应用意义巨大。

(5)加强与国外航空材料及材料标准管理部门、国内外适航管理部门等机构的交流和密切合作,及时调整相关政策和方向。

一成不变的不具有定期更新的航空材料和材料标准以及相关资料是非常不利于航空行业发展的。不断开展与国内外适航管理部门、国外 AMS 机构以及其他类似机构的交流和合作,促进中国民用飞机航空材料和材料标准体系进入国际市场,这些都是保证建立的航空材料和材料标准体系健康、良性可持续发展的关键。

(6)研究我国航空材料和材料标准被国外材料制造厂和飞机制造企业认可的方案。

只注重眼前利益对企业乃至国家来说是一种浪费。航空材料和材料标准被国外材料制造厂和飞机制造企业认可是我们必须达到的目标,也是我们国家航空材料和飞机产品走向世界的基础保证。

5 预期研究成果

开展中国民用飞机航空材料和材料标准体系研究将产生如下预期研究成果:

(1)为我国民用航空产品有关材料基础技术的可持续发展构建一个良性发展的组织机构和工作团队。

(2)编制出适合我国民用飞机设计、制造、维护等方面可以使用的航空材料各类标准、手册和指南,基本解决中国民用飞机目前存在的航空材料和标准方面面临的大部分问题和困难。

(3)基本解决目前我国民机发展中有国内材料和材料标准使用所面临的不利局面。

6 展望

仿制、国产化的路子我们已走了几十年,这种模式使得我们的产品基本不具有竞争力,并且严重制约了我们自主创新的思维,使我们忽视了基础技术的积累以及健康可持续发展。我们再不能把研究重点只放在制造出一个型号的飞机上来,我们必须清醒地看到我国的民用飞机为什么不大量采用我国的航空材料和材料标准? 我们的航空材料和材料标准为什么不被自己和别人接受? 必须花大力气来重点来研究我们自己的材料基础技术,只有真正解决并处理好了这些问题,才有可能扭转我国制造的民用飞机全面采用国外材料和材料标准的尴尬局面,才有可能真正实现我国民用飞机的跨越式发展,带动我国航空材料制造企业乃至整个材料行业做大做强理念。

(责编 夏宛)