

521283

复合材料研究进展

(第二届全国复合材料学术会议论文选编)

上 册

航空材料编辑部

复合材料研究进展

(第二届全国复合材料学术会 議論文选編)

航空材料編輯部

一九八四年 北京

复合材料研究进展

(第二届全国复合材料学术会议论文选编)

审 编: 宋焕成 刘方龙

陈烈民 洪时藏

编 辑: 洪时藏

出 版: 航空材料编辑部

印 刷: 北京航空学院印刷厂

1984年1月

工本费4.00元

说 明

中国航空学会、中国力学学会、中国宇航学会于一九八二年八月在哈尔滨市联合召开了第二届全国复合材料学术会议，会上交流的学术论文无论数量或质量，都比第一届学术会议有了显著增加和提高，反映出近几年来我国在先进复合材料领域的科技队伍进一步扩大，又取得了一批新成果，达到了新水平，预示着令人鼓舞的发展前景。这本《复合材料研究进展》就是本届会议交流和宣读的论文选编，内容包括树脂基和金属基复合材料的基体、增强体、固化剂、界面理论、工艺、性能、测试、力学、设计、疲劳、断裂及应用等，相当全面地概括了我国复合材料的进展与开发情况。

本书上、下册对于从事复合材料研究、生产、使用、教学工作的广大读者，对于从事这方面计划管理、科技情报及开发工作的部门和人员，是一本有益的参考资料，具有实用价值。

目前由于财力和人力的限制，难以将论文一一收入本书，即使收入的部分论文也不得不大大压缩篇幅，或只是很简单的摘要，特此敬告论文作者。书中转载了中国航空学会编印的第二届全国复合材料学术会议论文目录索引，作为附录，以供读者查考和利用。

本书在审稿、编辑、出版过程中得到了有关主管领导和兄弟部门的关心和支持，论文作者也给予了热情合作，《航空材料》编辑部的同志们付出了辛勤的劳动，关景茹同志精心重描和补描了所有图稿，牟致珂同志带病校对了全部图稿及部分文稿，特在此表示衷心感谢。

限于水平和经验，书中存在的错误和问题，请读者提出批评、指正。

审编小组

一九八三·十

目 录

我国纤维增强复合材料的发展概况

和前景(代前言)	胡振渭	(1)
----------------	-----	-----

树脂基复合材料

材料·工艺

环氧树脂分子量对复合材料固化工艺及其性能的影响

.....	聂嘉阳 谢淑芳	李镇南	(6)
-------	---------	-----	-----

复合材料用环氧树脂的初化

(三) 二酚基丙烷的增韧作用	马蕊然 马满珍	(13)
----------------------	---------	------

复合材料基体性能的比较及加压条件对材料性能

的影响	张学忠 詹美珍	(21)
-----------	---------	------

纤维缠绕复合材料中的绕线定理、原理和推理	冷兴武	(28)
----------------------------	-----	------

一种与碳纤维复合性能理想的新型三官能团树脂系统	孙树淳 杨懿等	(32)
-------------------------------	---------	------

用“双层薄片分析法”评价碳纤维/环氧树脂等复合

体系的固化工艺	刘士昕	(38)
---------------	-----	------

柔性接头材料工艺的试验研究	王 俊	(43)
---------------------	-----	------

碳纤维复合材料胶接工艺	张箕运	(47)
-------------------	-----	------

用溶液吸附法研究碳纤维表面反应性对复合材料性能的

影响	陈长明 孙嘉瑾 吴人洁	(52)
----------	-------------	------

碳纤维表面性能的研究(摘要)	张志谦 孙嘉瑾 吴人洁	(57)
----------------------	-------------	------

粘结界面的电子能谱研究(摘要)	宣有仙	(60)
-----------------------	-----	------

界面对短纤维增强复合材料性能影响的研究(摘要)	谢维章 田佩星	(62)
-------------------------------	---------	------

聚丙烯复合材料界面的研究——复合型含铬偶联剂在

玻璃纤维表面的偶联机理(摘要)	吴叙勤 金培文 张元民	(64)
-----------------------	-------------	------

AFG-90 环氧树脂的固化反应特性(摘要)	潘 昂 唐振新 华 蓓	(66)
------------------------------	-------------	------

原位固态缩聚尼龙66与碳纤维复合材料的界面效应和破

坏机理的研究(摘要)	曾汉民 冯 力	(68)
------------------	---------	------

高特性复合材料基体的研究——新型环氧树脂固化剂

二氨基二苯基醚的开发(摘要)	方光贵 高万良等	(71)
----------------------	----------	------

液体端羧基丁腈橡胶(CTBN)增韧环氧树脂的研究

——以有机液体酸酐为固化剂 (摘要)	李永德 赵世琦 孙以实 (73)
纤维状态对碳纤维复合材料性能的影响 (摘要)	冯翠雅 (75)
复合材料用环氧树脂的固化	
(四) 树脂基体的韧性对复合材料	
性能的影响 (摘要)	马蕊然 周希真等 (79)
碳纤维/环氧树脂复合材料固化过程中的	
直流电监控技术 (摘要)	李永柱 辛九范 (82)
电沉积处理对碳纤维/环氧树脂复合	
材料剪切性能和破坏模式的影响 (摘要)	何嘉松 吴人洁 (85)
聚苯硫醚及其碳纤维复合材料的破坏形态 (摘要)	曾汉民 何国仁 (88)
一次成型环氧-酚醛(锌)玻璃网蜂窝夹层结构雷达天线罩 (摘要)	殷立新 (91)
玻璃钢带达罩模压成型工艺的研究 (摘要)	胡金锁 (93)
碳纤维面板蜂窝夹层结构胶接固化故障分析 (摘要)	肖少伯 (96)
环氧树脂基复合材料研究 (摘要)	张明轩 陈珠金 石月娥 (98)

性能·测试

混杂复合材料几个力学行为的估算与实验	朱煊成 崔盛瑞 余顺海 (100)
树脂基复合材料吸湿量的预测和估算	欧阳国恩 安 可等 (105)
碳纤维复合材料板材的无损检验	刘于藩 潘载德 (110)
复合材料气孔含量的超声检测	余南廷 陈积懋 柯善骏 (115)
碳纤维复合材料拉伸试样设计	杨乃宾 孙以娟 (119)
碳纤维力学性能概率分布的研究 (摘要)	贾玉瑛 于锦生等 (121)
芳纶取向和晶态结构分析 (摘要)	王敬蓉 (124)
预浸料室温贮存试验 (摘要)	张凤翻 李佩兰 (127)
648环氧预浸料的动态介电分析的探索 (摘要)	杨向前 (130)
碳纤维及其原丝断面形貌分析研究 (摘要)	吴连生 (133)
碳/环氧复合材料热物理性能和抗热冲击特性 (摘要)	陆集平 (136)
碳纤维复合材料基本力学性能测定 (摘要)	沃西源 (138)
碳纤维强度的离散性及抽样检验子样计算法 (摘要)	杨树根 (141)
碳纤维/环氧树脂复合材料老化试验与吸湿量的试算 (摘要)	赵渠森 (144)
石墨纤维表面基团的测定——流动式微量量热法 (摘要)	陈雨萍 张中良等 (147)
复合材料吸湿行为及其对性能影响 (详细摘要)	孙蕊瑾 (150)
单向碳纤维复合材料弯曲性能试验方法研究 (摘要)	杨乃宾 孙以娟 (152)
用波速法测定复合材料的动弹性模量 (摘要)	徐耀廷 (155)

力学·设计

包括横向剪切影响的几种层压板矩形杂交应力元素	王俊奎 袁 元 (158)
纤维增强层板承受轴向压力屈曲的优化设计	蒋咏秋 汤 泉 (164)
复合材料无矩不对称层板等强优化设计方法	刘方龙 黄季璁 (170)

复合材料薄壁杆件的平衡问题	陈烈民(173)
复合材料破坏准则的唯象理论	周承偶(181)
纤维复合材料轴对称层板结构的温度场和应力场耦合效应	范炳鹤(189)
正交各向异性的多层、夹层和加筋扁壳的弯曲、 稳定和振动	王震鸣 戴涪陵(196)
碳纤维-树脂复合材料各层间粘胶在均匀 侧向压下的稳定性	蔡 洋 袁 方 杨 森(202)
弹性冲击动荷系数的计算及其对正交异性板的应用	张正国(208)
碳纤维/环氧异形梁刚度和强度的测定	李家驹(215)
纤维复合材料梁截面特性计算和铺层设计	陈国岩(220)
纤维复合材料层板弯曲与振动的有限层法分析	梁礼平 袁万林 周 殷(225)
纤维复合材料旋转梁的固有特性和动力响应	林冰心(232)
含孔层压板条净截面正应力的近似分析	赵建华 刘润桐(238)
碳/环氧复合材料螺栓接头强度试验	吴金泉(242)
考虑纵向剪切变形的复合材料薄壁梁弯曲问题(摘要)	陈烈民(244)
纤维增强复合材料工字形薄壁梁的应力计算(摘要)	陶梅贞(247)
纤维增强层合梁的刚度系数与振动方程(摘要)	张维栋(250)
飞机结构设计许用值分析(摘要)	郑锦榕(252)
碳纤维复合材料螺栓接头强度预测(摘要)	张全纯(256)
复合材料胶接设计的几个问题(摘要)	张志冬(259)
一种直升机复合材料旋翼桨叶剖面特性的 测量方法(摘要)	沈梦山 彬卫胜(262)
复合材料旋翼桨叶的调频方法(摘要)	王慕强 张明珍(264)
复合材料桨叶的振动问题(摘要)	王云剑(267)
论各向异性体的应力应变关系及刚度矩阵(摘要)	陈康华(271)
受内压复合球壳应力应变分析(摘要)	支振德(274)
偶联剂对复合材料内应力的影响(摘要)	谢逢堂(280)
复合材料应力应变关系加权柔度矩阵模型实验验证(摘要)	张福悦(282)
正交异性简支矩形板偏轴压缩的稳定性(摘要)	刘润桐 张国民等(285)
简支矩形复合板的最大临界载荷分析(摘要)	刘润桐 张国民 魏 俊(287)
碳纤维增强复合材料的加曲特性及其设计分析(摘要)	郑锦榕(289)
用有限元法分析复合材料板的稳定性问题(摘要)	王俊奎 戴涪陵(293)
复合材料夹层扁壳的有限挠度方程和线性 稳定问题(摘要)	刘国璜 王震鸣(296)
叠层复合材料旋转薄壳的静力与稳定分析(摘要)	张德众(298)
复合材料夹层薄壳有限元计算(摘要)	李禹河 陈丽薇(301)
层板大挠度有限元分析(摘要)	方崇明(305)
复合材料层板有限元分析(摘要)	王鑫伟 冯太华 李定夏(307)
复合材料旋转壳与迴转体组合结构的有限元分析(摘要)	朱菊芬 郭兆璞(310)

复合材料层间应力和湿热效应的有限元分析 (摘要)	洪良兴 吕樟权(315)
复合材料层板的强度分析及工程常数计算 (摘要)	樊发芬(318)
应用刚度不变量计算复合材料无矩层板的	
极限强度 (摘要)	马祖康 羊 始(322)
复合材料平衡对称层板铺层优化设计 (摘要)	高树理(325)
按刚度要求的复合材料铺层设计 (摘要)	崔德刚 丁桂珍 唐 青(329)
用多参数非均匀等效体研究圆柱正交异性复合材料	
的剪切有效模量 (摘要)	范赋群 董万林 张元亿(332)
各种边界条件下正交层板的解法探讨	
——用加权残数法解正交层板的弯曲问题 (摘要)	范业立(333)
受横向均布载荷周边固定正交叠层矩形板的高阶理论解 (摘要)	张元亿(337)
复合材料结构的最大承载能力分析 (摘要)	成万植 张宏魁 于怀孝(342)
任意四边形平面单元在复合材料结构分析中的应用 (摘要)	蔡湘涛(347)
纤维增强复合材料对称角叠层板的	
弯曲分析 (摘要)	李德威 范业立 周 履(351)
各向异性叠层矩形板大挠度弯曲问题 (摘要)	黄小清 梁继光(354)
一种非经典的近似的叠层板弯曲理论 (摘要)	梁继光(357)
复合材料螺栓连接设计 (摘要)	羊 始(361)
均衡型层合板的力学性质 (摘要)	刘锡礼 肖 军 高巨龙(363)
复合材料层板强度的初步研究 (摘要)	刘方龙 杨明聪等(366)

疲劳·断裂

纤维增强复合材料层板的层间拉伸强度	毛天祥 M.J. 欧文(369)
复合材料层间剪切强度研究	张双寅(374)
复合材料层合板正交层间的剪切强度	李顺林(379)
玻璃/环氧复合材料的剪切特性	平醒华 袁振民 王 硕(383)
碳纤维复合材料拉一拉疲劳试验	王连玉(387)
纤维复合材料的形变功密度断裂准则	薛克兴 周 瑾(392)
单向复合材料的拉伸破坏模式与拉伸强度	白淑贞 卢 艳(397)
纤维增强复合材料层板孔边应力分析	刘方龙 寇长河 曲大庄(401)
复合材料加筋板剪切稳定性计算及试验研究	陈绍杰(407)
碳纤维/环氧树脂复合材料连接参数的试验研究	肖才元(412)
复合材料冲击行为的研究	赵惠纯 严以牧(418)
碳/环氧复合材料缺口层板拉一拉疲劳特性研究	周 瑾 薛克兴(422)
连续纤维单向增强复合材料偏轴强度极值分析	胡炬才(425)
碳纤维增强环氧复合材料疲劳特性 (摘要)	沈杏娟 李 禾(431)
复合材料在疲劳试验中的温升程度与损伤扩展的非接触实时	
监测研究——红外技术在力学测试中的应用 (摘要)	童家贤(433)
大标距复合材料试件的压缩试验 (摘要)	张 宝 许陆文(435)

复合材料板材压缩性能试验方法研究 (摘要)	童家贤 李顺和等(438)
碳纤维/环氧树脂复合材料层板损伤-断裂历程	
有限元分析 (摘要)	薛克兴 李炳功等(440)
断裂模式与纤维材料的断裂时间 (摘要)	嵇醒 邹祖炜(443)
增强聚丙烯的力学性质及断裂模式的研究 (摘要)	卢锡年(446)
正交层板断裂模型研究 (摘要)	薛元德 岑金根(448)
用云纹法研究纤维增强复合材料的破坏 (摘要)	顾志建(450)
纤维增强复合材料的破坏准则	
——基体控制破坏理论 (摘要)	张汝光 许守勃(452)
碳纤维增强塑料短梁层间剪切疲劳性能	
测定中若干问题的探讨 (摘要)	张宝成 孟香荣 吴人洁(454)
碳纤维/环氧树脂复合材料挤压应力与位移分析 (摘要)	肖忠芬(456)
短纤维增强复合材料拉伸强度研究 (摘要)	谢维章(459)
碳纤维复合材料叠层平板孔边应力分析 (摘要)	羊 铃(462)
湿度对复合材料破坏强度的影响 (摘要)	谢鸣九(464)
复合材料强度理论的试验验证 (摘要)	谢鸣九(466)
纤维缠绕内压容器的强度及内刚度分析摘要	王秉权(468)

金属基复合材料

碳化硅纤维增强铝复合材料实验研究	魏克泰 黄大墩 赵 恂(470)
碳纤维和金属相容性的研究	汪雨生 于 琨(479)
带碳化硼涂层的碳纤维	徐洪清(484)
碳/铝复合材料的界面反应	李贤淦 张国定(488)
碳纤维的表面形态和断口特征的分析	万中玉(492)
从有机聚合物转化成无机纤维——碳化硅纤维	
的研究 (摘要)	杨淑全 刘心慰等(499)
碳/铝复合丝的研究 (摘要)	李贤淦 郭公毅等(503)
碳/铝复合材料的扩散粘结 (二) (摘要)	侯鼎康 赵昌正(505)
金属基复合板拉伸试验技术中的两个问题 (摘要)	洪水棕 吴振坤等(508)
复合材料金相试样的制备 (摘要)	杨德明 陈安明(510)
多元复合材料的杨氏模量及杨氏模量温度系数 (摘要)	刘文能(513)
碳/铝复合材料断裂现象分析 (摘要)	张国定 李贤淦 王文龙(515)

附录	(519)
----------	-------

第二届全国复合材料学术会议论文目录索引

我国纤维增强复合材料的发展概况和前景

(代前言)

自本世纪四十年代以来,在物理、化学、力学等基础学科近代成果和工业技术发展的基础上,复合材料作为一门崭新的学科获得了迅速的发展。

我国对复合材料的研究是随着新型纤维的出现而发展的,五十年代末期首先研制的是玻璃纤维增强塑料。最近几年,国家有关部、委及学术组织和相继召开各种规模的会议讨论制订发展复合材料的规划、交流研究的成果、介绍应用的经验。在复合材料领域里,不仅有材料工作者从事开发研究,也吸引了大批化学家、物理学家、数学家、力学家以及广大的工程设计师和工艺师,形成了一支有一定规模的科研技术队伍,具备了相当的研究和生产能力。

玻璃纤维及其复合材料是早期发展的新型材料。我国对玻璃纤维复合材料的开发,迄今已有二十余年的历史。目前已拥有许多专业研究所和生产工厂,各使用部门也设有相应的研究机构和生产车间,形成了一个较为完整的包含研究、设计与生产的体系,并为国防和民用工业提供了一批重大成果。目前,玻璃纤维增强复合材料在航空、航天工程技术与战略武器上正趋向被性能更好的高级复合材料所代替,但作为第一代新型复合材料,它在国民经济中仍具有重大价值。由于玻璃纤维的强度高、价格低、来源丰富、工艺性好,玻璃纤维与其他新型纤维混杂使用,又会设计出性能更好的新型复合材料,因此,它的使用范围仍在不断扩大。目前,我国玻璃纤维及其织物大都用作电气绝缘材料和天然纤维的代用材料,而制造复合材料的玻璃纤维,则仅占很少一部分,包括中碱纤维、无碱纤维、高强纤维、高硅氧纤维及其织物等产品的规格品种还不齐全,尚不能满足各方面的需要。

玻璃纤维增强复合材料按其成型方法来说,大体可分为三类:缠绕成型、高压成型(模压或层压)和低压成型(手糊或其他方法)。

六十年代末,我国很多单位研制纤维缠绕玻璃钢气瓶,但由于当时对这种新型材料的性能缺乏充分的研究,产品质量存在一些问题,因而未能大量推广应用。但这一时期的研制工作,却提出了一系列需要深入研究的课题。经过十几年的努力,现在缠绕成型的玻璃纤维增强复合材料构件的质量有了显著的提高,品种不断增加,其典型产品有:固体火箭发动机的燃烧室壳体、槽车、大容积贮罐、气瓶、液化石油气贮罐、单兵火箭发射筒等等。低压成型的玻璃纤维增强复合材料以手糊法为主,在建筑、运输、化工等领域获得了广泛的应用,其典型产品有:波纹瓦、建筑预制构件、卫生间成套设备、食品工业用大容积反应罐、化工厂合成氨碳化塔衬里、氯化氢回收塔衬里、防腐层及貯液反应槽罐、排风扇叶片等等。目前,正用手糊成型法试制汽车的前端板、发动机罩、车篷、窗框、车门、挡泥板及内部装饰件等等。手糊成型玻璃钢赛艇及小型船只已经投入使用;高压成型的玻璃纤维增强复合材料产品早已应用于电气绝缘方面。近年来又发展了一些新型模塑料,如片状模塑料、高强模塑料及增强聚丙烯模塑料等等。由于简化了成型工艺,便于控制产品质量,可用于制作汽车的齿

轮、活塞、传动机件、油泵以及承载支架等等，模压玻璃钢枪托可替代稀缺的优质木材。另外，以玻璃纤维织物增强树脂为面板的蜂窝夹层及泡沫夹层材料，已被公认是性能良好的结构材料。我国已用玻璃纤维蜂窝夹层材料制成直升飞机的旋翼和直径几十米的雷达罩。综合使用纤维缠绕工艺、模压工艺和夹层结构的构件也在研制中，并用于水管、石油工业、采矿工业以及受外压、侧压和其它一些特殊载荷的部件。

随着我国战略导弹及空间技术的发展，高强、高弹玻璃纤维缠绕结构已用于制造大型固体火箭发动机壳体和各种器压器以及用于制造弹头的防热结构和回收卫星的再入舱。

尽管玻璃纤维增强复合材料的比刚度及其它一些性能尚不够理想，在对重量敏感和工作条件苛刻的尖端技术领域，已逐渐被其它新型复合材料所取代，但玻璃纤维增强复合材料仍不失为一种性能良好的材料，在我国国民经济建设的各个领域中将继续发挥其应有的作用。

我国对碳纤维的发展开始于六十年代中期。由于碳纤维的密度低、强度高、模量高、热膨胀系数小并耐各种介质的腐蚀，它不仅能制成高聚物基复合材料，也能与金属（如铝、镁）复合，制成金属基复合材料，还能与石英复合制成陶瓷基复合材料。因此，碳纤维是一种较为理想的增强体。碳纤维增强复合材料作为结构材料、防热材料或阻尼减振材料，首先被用于航空与航天飞行器的某些构件上。目前我国碳纤维的质量和数量正不断提高，价格也有所下降。在多年研制玻璃纤维增强复合材料的基础上，我国对碳纤维复合材料的基本性能、典型结构、成型工艺及结构设计和强度分析等已开展了多方面的研究。正在研制或已投入应用的有飞机发动机机扇叶片、进气道外侧壁板、舱口盖、垂直尾翼及水平尾翼、直升飞机旋翼、卫星壳体、太阳能电池基板、天线及天线支架等。还有一些载荷比较大的构件，如机翼大梁、运载火箭的级间段、仪器舱等也在研制中。一些用于工作条件苛刻的碳/耐热树脂复合材料、碳/石英复合材料、碳/碳复合材料以及碳/金属复合材料部件也都在研究与试验中。

近几年来，世界许多国家逐渐将碳纤维复合材料应用于民用工业，我国在这方面也做了一些工作。用碳纤维复合材料制造的部件已有，离心机主要部件、大功率发电机的护环、通讯系统的天线反射器轴承、密封件、刹车片以及人工心脏瓣膜等。但由于我国目前碳纤维的产量不大，品种也较少，且价格较贵，在某种程度上限制了它的应用。预计随着原材料和制造工艺的改进，产品的价格可望迅速下降。国际市场上，一九六五年碳纤维的售价是500美元/磅，一九八〇年则降为20美元/磅，这种趋势也展现了我国碳纤维及其复合材料发展的前景。

碳纤维的比模量较高，这对要求高刚度的构件来说，是一种极有吸引力的增强体。六十年代初期，我国就开始了对碳纤维及其复合材料的研究，所研制的碳/铝复合材料的机械性能和物理性能与国外当时的水平相接近。但由于碳纤维的生产工艺复杂，难于实现大规模生产，且价格昂贵，因而一直停留在实验研究中，没有投入使用。后来，由于碳纤维及碳化硅纤维的出现，并由于这些纤维的树脂基复合材料的性能大都与碳纤维复合材料相接近，同时在组织工业化生产和价格等方面却都优于碳纤维，因而碳纤维已没有大量发展的必要。

一九六八年，美国杜邦公司研制成功了一种高强度、高模量的有机纤维——芳纶，一九七二年正式投产，商品名称为Kevlar，产品规格有Kevlar、Kevlar-29和Kevlar-49等几种。前两种多用作增强橡胶制品的帘子线和制做汽车轮胎及防弹衣等，Kevlar-49则主

要用于制造树脂基复合材料。芳纶抗拉强度大，弹性模量高，密度小，且易于同树脂亲合，是制造结构复合材料的良好增强体。芳纶与其它几种纤维的性能比较如下表。由于芳纶的比强度高于其它几种纤维，现已成功地用于航天、航空、交通、运输等部门。

芳纶与其它几种常用纤维性能的比较表

	芳纶	石棉纤维	碳纤维	玻璃纤维	碳化硅纤维		
					Mark-I	Mark-II	Mark-III
			T 300				
密度, 克/厘米 ³	1.44	2.54	1.8	2.62 (2)	2.5	2.5	2.5
拉伸强度, 公斤/毫米 ²	280	245	285	280 (350)	300	350	250
模量, 吨/毫米 ²	14	7	23.5	39 (38~40)	20	20	15
比强度, $\times 10^7$ 厘米	1.94	0.965	1.58	1.1 (1.75)	1.2	1.4	0.8
比模量, $\times 10^9$ 厘米	0.97	0.276	1.30	1.5 (1.9~2.1)	0.8	0.8	0.6

目前，在国外芳纶已完全代替了高强度玻璃纤维缠绕成型大型固体火箭发动机燃烧室壳体。对芳纶及其复合材料，我国已经开始研制，在原材料的合成、纤维生产及复合材料的应用等方面都已开展了工作。

碳化硅纤维是近年发展起来的一种性能较好的纤维。碳化硅纤维的突出优点是能与金属可直接复合，并能在1200℃的高温下长期使用，因而成为一种引人注目的新型材料。碳化硅纤维有两种类型：一是在钨芯或碳丝芯上用气相沉积法制成的碳化硅长纤维，一是由二甲基二氯硅烷经聚合、纺丝制成有机纤维后，再经高温处理，最终形成 β 型碳化硅连续纤维。前者工艺和碳纤维相类似，不利于大规模发展；后者由于原材料丰富，工艺过程简单，且易于组织工业化生产，现已由日本碳公司批量供应市场，商品名称为“尼卡龙”。 β 型碳化硅纤维按其有机合成的原材料和制造工艺的不同，分为Mark-I、Mark-II、Mark-III等类型，其性能如上表。碳化硅/环氧复合材料的突出优点是它的层间剪切强度比较高，为碳/环氧层间剪切强度的1.5~2倍。 β 型碳化硅纤维与芳纶混杂使用，可克服芳纶的许多弱点。 β 型碳化硅纤维易与金属复合，可采用粉末冶金法、电镀法、等离子喷涂法、蒸镀法以及金属渗渍和压铸等方法制成铝、镁、镍、钛、钨、钼、铁、银、铜、钴等金属基复合材料。预计碳化硅纤维增强金属复合材料将是飞机发动机和航天飞机结构的较为理想的材料。碳化硅纤维增强陶瓷复合材料，可大大提高构件的使用温度，并能抵抗粒子的侵蚀，是良好的防热与防核爆材料。近年来，我国已开始了对碳化硅纤维及其复合材料的研究工作。

随着复合材料的发展，我国复合材料的力学分析和结构设计水平也日益提高。在复合材料基本力学性能测定、微观力学、结构稳定性计算、断裂力学、热应力热变形计算，以及

限有无法、计算力学、优化设计等方面，都取得了进展。在这些方面，我国目前的水平与世界先进水平之间的差距，比材料工艺方面的差距小。

复合材料是力学工作者可大显身手的新领域。在此领域领先的开拓者，主要是一些化学、化工和材料工艺方面的专家和学者。一般说来，他们在力学方面的知识是不足用以分析复合材料的力学问题的。他们最关注的是解决材料的“有无”和质量“高低”问题，即首先把纤维增强复合材料和由它组成的结构制造出来，而把结构是否合理、重量是否最轻、材料的效能是否最高、价格是否最低等问题留给力学专家们去解决，回头再以力学家的观点来检查最初采用复合材料的结构，就会发现设计方法尽管简便和实用，但却显得过于粗糙。例如等代设计：把复合材料作为常规材料简单的代用品，用与常规材料相同的结构型式、尺寸、形状甚至连接方式来制做复合材料的结构件；网格分析：在力学分析中，认为纤维复合材料中只有纤维承力，完全忽略基体的存在及其作用；各向同性设计：不认为复合材料的各向异性是一种可资利用的优势，反而为其区别于常规材料的各向同性而苦恼，甚至把复合材料的各向异性看作是这种材料的“缺点”，在结构设计中加以“修正”，即将复合材料的各向异性人为地造成各向同性；对称设计：为了避免由于固化温度和使用温度之间的差别引起的热翘曲而普遍采用一种叠层方式。

上述的几种历史上采用过或目前仍大量使用的设计与分析方法，反映了人们对复合材料的客观规律的认识水平。这些设计方法还不能全盘否定。例如，对于不必进行细致分析的部位或在时间不允许进行细致分析的条件下，等代设计是一种可以迅速解决问题的近似方法；网格分析对于纤维缠绕内压力容器来说，可给出铺层比的简便的工艺设计；各向同性设计对承受载荷方向多变的部件是有用的；对称铺层可简化工艺操作。但是，这些设计方法不分具体条件的到处套用，则会限制复合材料固有优势的充分发挥。一般来说，它将使结构偏于笨拙、保守、用料多、造价贵，而可靠性却不见得高。有人估计，现在使用的玻璃纤维增强复合材料，一般仅发挥了纤维强度潜力的30~60%。由此可见，即使利用现有的纤维和基体，只要进行合理的设计，就可使复合材料结构性能发生显著的飞跃。

复合材料是一门新兴的边缘学科，不仅复合材料本身是不同质量和不同形状的原材料的复合，它也要求不同专业知识与经验的“复合”，从事复合材料开发的工作者，如力学家们要懂得一些材料工艺的知识，材料工艺家们要懂得一些力学的知识。这种知识的普及与渗透对复合材料的发展，具有重大和深远的意义。正如不同性质原材料的复合，能产生优于所用原材料性能的“复合效应”一样，不同领域知识的“复合”，也将发挥类似的“效应”。

当前摆在复合材料学家面前的主要任务是：

1. 研究和确定复合材料力学性能的表达与测试的科学统一方法；
2. 向结构设计师和材料工艺家普及复合材料力学的基本知识，使所设计的复合材料结构能最充分地发挥这种材料的优势与潜力；
3. 寻求符合复合材料规律的简便易学的工程设计方法，编制方便适用的公式、图表、曲线和标准计算机程序。至于复合材料力学中一些专门问题（如精确的微观力学公式、从组分的性能来预测复合材料的性能、复合材料分析的有限元法与计算机的利用、复合材料的断裂韧性与破坏过程以及各种结构的稳定和热变形问题等等），当然也是力学工作者努力探索与解决的课题。

我国二十几年来，纤维增强复合材料的发展是随着新型纤维的出现而逐渐推进的。玻璃

纤维增强复合材料，目前虽还赶不上先进国家的产量、质量和应用，但它已遍及国防和民用工业的各个领域。碳纤维增强复合材料的研究与应用，虽然只是近十几年内的事，但它已在航天和航空等工业获得了重视。总的看来，我国对复合材料的开发比起世界先进水平还存在一定的差距。迅速赶上世界先进水平，推广与扩大复合材料在国防和国民经济各部门的应用，是当前从事复合材料工作者的一项重要任务。我们一方面固然可借鉴国外的先进经验，但更重要的是走自己发展的道路。当前我国除大力发展玻璃纤维增强复合材料以满足国防工业的需要外，还应努力提高和稳定玻璃纤维的质量，降低价格，推广应用。碳纤维和芳纶及其复合材料已作为今后发展的重点。在研究高性能以保证特殊需要的同时，也在研制普通的品种和规格并增加产量，以利扩大使用。陶瓷型纤维，如碳化硅、氮化硅、氧化铝、氧化硼等新型纤维，是未来复合材料大有希望的增强体，正在有步骤地进行预研。基体材料的性能对提高和稳定复合材料的性能关系很大，树脂基复合材料仍是今后用途最广的材料，用于各种条件的基体树脂，如环氧、聚酯及聚酰亚胺等，使其系列化应是今后研究的重点。金属基复合材料及陶瓷基复合材料，虽然历史较短，但由于它们的优异性能，正开展预研工作，预计会迅速发展。

一九八二年八月在哈尔滨市由中国航空学会、中国宇航学会和中国力学学会联合召开了第二届全国复合材料学术会议。这是我国复合材料工作者的又一次盛会。这本“文集”就是本届会议上宣读论文的选编。它反映了我国复合材料科学技术的现状和已达到的水平，是我国复合材料发展道路上的又一个里程碑。

我国复合材料事业正处在兴旺发达的时期，它具有广阔的天地与光辉的前景，深信在不远的将来，一定会达到世界先进水平，为我国的四化建设做出应有的贡献。

胡振渭

一九八三年五月于国防科学技术大学

环氧树脂分子量对复合材料 固化工艺及其性能的影响

聶嘉阳 謝淑芳 宇鎮南

(航天工业部第七〇三研究所)

摘 要

本文借助高效液相色谱和DSC、TGA、DMA、粘弹谱仪及其它常用方法,揭示树脂分子量不同对复合材料固化工艺及其性能的影响。試驗表明:分子量較小的环氧树脂,其凝胶時間长,流动性大,初始反应溫度及峰頂溫度高,反应熱小,耐熱性(如馬丁耐熱、玻璃化溫度及分解溫度、熱失重)以及150℃質量保持特性等均比分子量高的树脂差。

前 言

先进复合材料中的原材料环氧树脂,实际上是个“混合体系”。不同批次生产出来的树脂,其化学组成有所变化。而这些变化影响树脂的化学、物理、力学和热性能,从而必然影响成型工艺参数和复合材料性能及质量的稳定性。随着现代科学技术的发展和复合材料应用的实践,证明目前商用树脂规格指标远不能满足此要求,而必须进行“指纹分析”,严格控制树脂的化学组成。本文仅对树脂组成变化的一个重要因素分子量和分子量分布不同引起各种性能的变化加以研究。

試驗結果与討論

原料树脂特性

环氧树脂同其它高聚物一样,代表重复链节多少的 n 值不同,其分子量不同;不同 n 值分子在树脂中的数量,影响分子量分布。

本文研究用环氧树脂的出厂规格指标见表1,实际上各批次树脂的化学组成(见图1所示)有相当差别。因其软化点、数均分子量、环氧值各异(见表2)。

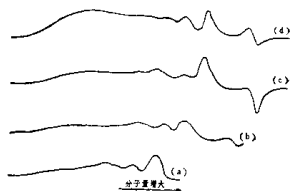


图1 不同批次环氧树脂GPC分析

图 1 说明: 树脂软化点, °C

号	(a)	(b)	(c)	(d)
	28	43	49	53

表1 环氧树脂出厂规格指标

软化点 °C	环氧值	有机氯 当量/100克	无机氯	挥发份 %	生产厂
≤70	0.46~0.53	0.08	0.005	≤2	上海树脂厂
≤70	0.44	0.08	0.005	≤2	无锡树脂厂

表2 不同批次环氧树脂复测结果

软化点, °C	数均分子量, $\bar{M}_n$	环氧值, 当量/100克
28	436	0.53
43	542	0.48
49	617	0.46
53	639	0.44

在相同固化剂下研究不同分子量及分子量分布树脂对各种性能的影响, 其结果如下:

1. 凝胶时间

凝胶时间反应树脂在升温过程或恒定反应温度下, 由线型分子反应而支化, 由流动状态逐渐变稠进而变为凝胶状态的速度, 是复合材料固化过程选择适当加压时机的重要参考依据之一。由图 2 可看出, 树脂分子量不同, 凝胶时间差别很大, 在试验批次树脂范围内, 其凝胶时间相差 2~3 倍。在所有试验温度下, 分子量较高的树脂, 凝胶速度均快, 分子量较低者, 则较慢。从而对确定适当加压时机造成困难, 不利于固化工艺的稳定。

2. 流动性

预浸材料质量对复合材料质量有举足轻重的影响。其指标之一流动性, 系指在压制条件下树脂流失量之多少。显然, 流动性过大会使凝胶过多, 造成产品贫胶; 而流动性过小, 则

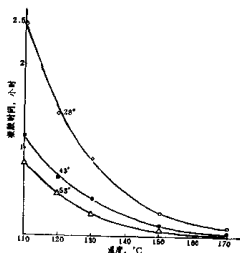


图2 648#环氧树脂凝胶时间与温度的关系

可压制性差，孔隙率增高；流胶量多少不同会使产品纤维体积含量变化大，以上种种均会影响产品的性能和质量。虽然影响流动性的因素不少，如树脂含量、挥发份、预固化程度等，仅就树脂分子量的影响而论（见表3），分子量低的树脂流动性大，在试验批次树脂范围内，流动性相差20%左右，这在稳定的固化工艺中是难于采用的。

表3 不同批次树脂流动性

树脂软化点, °C	流动性, %
28	36
43	22
53	16

3. 固化反应特征

环氧树脂的固化反应特征，由DSC曲线测得的峰始温度（ T_a ）、峰顶温度（ T_b ）、峰终温度（ T_c ）、反应时间（ τ ）及反应热 ΔH 等可反映出。由表4展示的规律性结果可看出：随着树脂分子量增加， T_a 、 T_b 及 T_c 逐渐降低，而 τ 延长， ΔH 增大。其中以 T_a 、 T_b 最明显，相差十几度，势必将显著影响固化工艺及产品质量。

表4 不同批次树脂的热效应参数

树脂软化点, °C	T_a , °C	T_b , °C	T_c , °C	τ , 分	ΔH , 毫卡/毫克
28	126	187	241	116	69
43	124	176	240	115	79
49	118	175	239	120	83
53	113	171	237	125	90

4. 耐热性

用树脂浇铸体测马丁耐热，既反映不同树脂耐热性变化（表5），又可看出受热后形变量的大小（图3）。不难看出：树脂分子量增加，马丁耐热温度明显提高，在测试树脂范围内，相差高达55°C；而且在所有温度下，分子量高的树脂形变量较小，达到相同形变量的温度，分子量高的树脂明显提高。由此得出下列结论：（1）不改变树脂系统，仅控制树脂不同分子量，可满足不同工艺和不同使用温度要求；（2）不控制树脂分子量范围，会造成复合材料产品的耐热性及其它性能分散性过大。