第6卷第4期　　复合材料学报　　Vol.6 No.4
1989年12月　　ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA　　December 1989

试谈复合材料力学在发展复合材料过程中所起的作用*

顾震隆

复合材料研究室
哈尔滨工业大学　航天学院

摘　要

本文首先讨论复合材料发展中所遇到的力学方面的问题，指出复合材料力学必须与生产实践，具体的复合材料和实验相结合才能得到具有实际意义的研究结果。最后分析我国力学工作者如何才能更好地为发展复合材料的事业服务。

一、发展复合材料所遇到的力学问题

推动复合材料发展的动力是生产实践对它的要求和应用过程中的各种材料之间的竞争，为了竞争取胜，作为结构材料的复合材料的发展，几乎每走一步都离不开力学工作者的积极参加（图1）。

复合材料本身是由组分材料所制成的具有无穷多冗余约束的结构，为了搞懂组分材料和复合材料力学性能之间的关系，就需要力学工作者对基体，增强相等组分材料进行研究诸如基体韧性的影响和单丝强度与纤维束强度之间的关系等问题。但有关组分材料的研制等问题主要还是材料科学的任务。固体力学只是从侧面提出应该达到的要求而已。

固化工艺是提高复合材料质量和降低成本的重要环节，要把它从经验提高成为科学，关键是要把工艺过程模型化和计算机控制的自动化，美国Stanford大学的Springer教授所提出的模型皆在提供各点的温度，粘度，固化程度，树脂流动，气泡尺寸和残余应力以及它们随时间变化的规律，从而可以预报制造出来的复合材料的力学性能，并根据所要求的性能来确定最佳的固化温度和压力曲线。结合固化过程中的有关参数测量，反馈给计算机实现固化

* 本项研究工作得到国家自然科学基金委员会的资助
本文1988年4月收到

过程的控制和自动化。美国Northrop飞机公司甚至编制了复合材料制造工艺的三维程序RAMPC。这个程序的理论基础是Campbell的计算机辅助的复合材料的固化模型，它包含有五个子模型：热交换模型，流动/凝固模型，简化的汽泡模型，反应动力学的经验模型和粘度的经验模型。把这个程序与CAD/CAM软件系统结合，就可以把材料制造，工艺设计以致飞结构设计一气呵成。从而缩短新机种的研制周期，改变原始的作业方式。固化工艺中会遇到流变力学，固化（残余）应力等力学问题，需要力学工作者积极参与，才能圆满解决综合性很强的固化工艺问题。

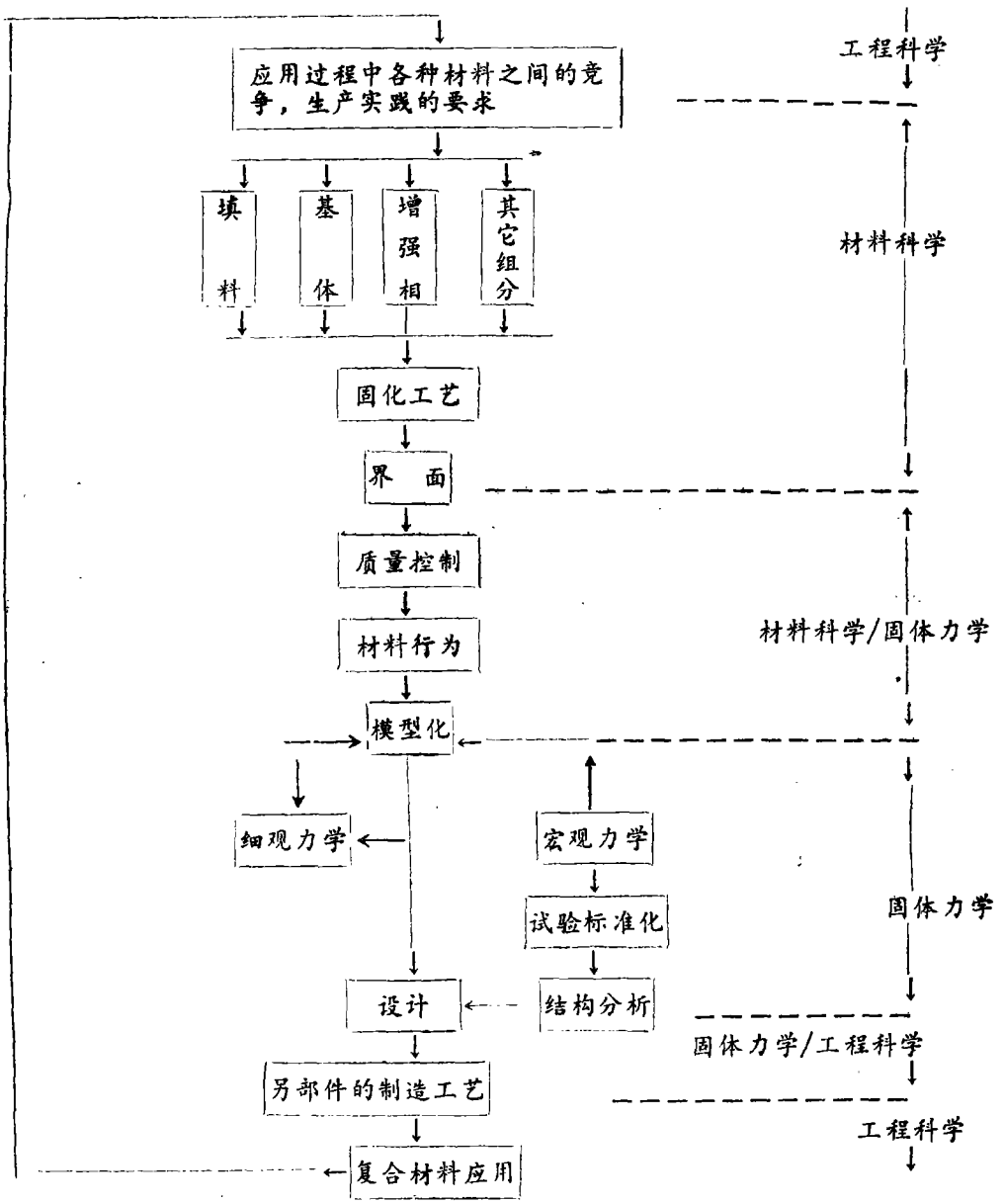

图1

有人说纤维/基体界面是复合材料的“心脏”、因为纤维之所以能够发挥其高强度的优势是依靠这个界面传递力的。但是至今人们对界面还是不完全明白，很多互相矛盾的报导无法解释，因为界面的实际情况无法进行直接观测。用简化的模型只能得出定性的结果，在70年代，力学工作曾经一度介入过界面的研究，后来发现由于问题的微观层次太高，其复杂性远远超过预料，宏观力学已无济于事。即使如此，在化学工作者和材料工作者对界面进行顽强地研究过程中，力学工作者给予配合是完全必要的。

为了保证固化成的复合材料具有合格的质量，不但在固化前组分材料要通过抽样检验，而且对固化后的复合材料也是要作无损探伤。探测的内容包括树脂的固化程度，树脂的气孔率，纤维体积比，纤维的方向和单层板铺陈方向的偏差，纤维/基体的界面粘结条件，脱层和穿层微裂纹，杂质以及与相邻结构的粘结质量等等。目前无损检测的技术有许多种类，常用的有声发射，超声—C—扫描，软—x光照相等等。力学工作者对无损检测有很大兴领，不但是因为无损探伤往往是力学实验技术的一部份，而且它的原理与力学有密切的连系，现在它已经成为近代微结构力学的一个不可缺少的手段。

为了合理地应用这一种新型结构材料，必须研究其材料行为。这里包括：力学性能及其表征、强度、撞击或瞬时加载时的动态性能、损伤、断裂、疲劳、蠕变和粘弹性、热性能、温湿影响、长期强度、磨损、腐蚀等等。随着生产实践的发展，对复合材料不断提出新的要求，于是复合材料这个家族成员越来越多。每出现一个有实用价值的新材料，就要求对它的行为进行研究。所以目前复合材料行为的研究是复合材料工作者的经常业务。当然对材料行为的研究离不开实验的方法。不过，复合材料是形形色色的结构，不能对每一种结构作完实验之后才认识它们的力学行为，必须把材料行为模型化，才能在有限个实验的基础上就可以预报各种复合材料的力学行为。在没有发生损伤之前的弹性阶段，复合材料层板或层壳可以在面内均匀化、加上厚度方向的Kirchhoff假设或其它假设，就可以用刚度系数Aij，Bij和Dij来表征层板的弹性性能。换言之，在损伤之前，复合材料层板可以模型化为弹性的，均匀的各向异性体、但是由于增强相和基体相的强度相差悬殊，如果迁就基体，增强相的优势无法充分发挥、为发挥增强相的优势，基体相不可避免会有损伤。所以即使在航空航天飞行器上也不要求杜绝损伤的产生，只要确定一个合理的损伤容限即可。

于是，问题集中在一个焦点，即如何为损伤后的复合材料建立力学模型。复合材料的损伤模式很多，其演化又是一个随机过程，而且由于损伤的尺寸可以跟宏观尺寸相比，所以复合材料实际上已不能看成是连续体了。为损伤的复合材料建立力学模型变成了研究复合材料力学的关键。只有解决了这个关键，复合材料力学才能发展成真正的技术科学。图2表示技术科学的解决问题的途径、通过观察，提出设想，然后在既定的条件下，通过实验来对提出的设想作进一步的考虑。接着作一定的理想之后，把一个实际问题，化简成反映本质的模型，用适当的数学模型来求解。最后用实验来验证，如果证明是正确的，则得到理论。

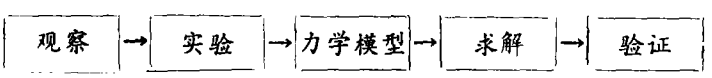

图2　技术科学解决问题的途径

因为复合材料是组分材料制成的结构，所以从细观结构的角度来研究是顺理成章的。这种细观力学的途径应该反映损伤之后的复合材料所具有的非连续性，非均匀和随机性、传统

的连续介质力学看来难以对付如此复杂的问题，需要建立一个新的力学模型，结合损伤之后的复合材料的微结构来研究不同外界条件下的材料行为，顺便还可以揭示出复合材料的损伤机理，这也是材料科学很感兴趣的。

另一方面，因为工程实践所需要的还是宏观的设计参数，如刚度、强度等，它是某一个标距之内的平均参数。所以细观力学的途径还要求通过宏观力学与工程实践相沟通。

传统的宏观力学与细观力不同，是唯象研究，它不能揭示材料本身的变形、损伤或破坏的机理。因为它采用的是传统的唯象的力学模型。

复合材料本身具有各自的个性，加上不同的固化工艺参数，不同的试验方法，会得出不同的力学性能数据。为了设计的需要，必须统一试验标准，建立可靠的数据库，这是一项力学工作者责无旁贷的任务。

结构分析是固体力学的传统业务，不过，今天计算机和计算力学已得到长足的发展，加上功能越来越完善的通用程序，工程人员已经掌握了日常设计中所需要的结构分析。当然这并不是说结构分析的问题已不再需要研究了。

复合材料另部件的设计，也需要更多的力学知识，譬如飞机设计可以利用复合材料的特点，发挥气动弹性剪裁的潜力，得到更合理的设计方案。从这个意义上来说，正象设计人员深入结构分析一样，固体力学也在更深入地插足于复合材料另部件的设计，它们之间的边界变得模糊起来，固体力学与相邻的学科在边界上在重新界定其活动范围。

复合材料另部件的制造工艺往往是跟材料本身的制造工艺一起来考虑的，尽可能减少另部件之间的事后连接和机械加工，因为这些地方往往是整个结构的薄弱环节。不过有时这又不可避免，于是又不得不求助于固体力学。

先进的复合材料只有20多年的历史，人们对它的认识还很肤浅。复合材料力学仅仅处于发展的初期阶段，一个复合材料另部件在试用阶段有时会出现意料不到的问题。有时工程实践对它存在一定的疑虑。于是工程实践又提出了新的要求，这又促使各种不同材料的新的一轮竞争。正是这种竞争迫使复合材料进一步发展。与此同时，复合材料力学也一步一步成长起来。由此可见复合材料力学的发展必须与生产实践，与具体的复合材料和与实验结合起来，才能得到有价值的研究结果。

二、我国复合材料力学界的状况

按国家自然科学基金委员会的要求，对全国从事复合材料力学工作的单位作了初步调查研究，现将调查结果报导如下。

调查的课题组共60个，其分布情况如表1所示。

表1　从事复合材料力学的课题组的分布情况

高等院校			研究所或设计所				
航天	航空	其它	航天	航空	船舶	玻璃钢	其它
6	19	19	4	5	1	2	4

另外还有一些与复合材料力学有关的具有一定代表性的单位，如航空航天部702所，41所，14所，一院一部，三院三部，611所，602所，哈尔滨飞机制造公司等单位有待进一步调查。从现在所得的资料来看，我国复合材料的应用遍及航天、航空、汽车、船舶、通讯，机械制造，土木建筑，能源，医学等工业，其中航空航天课题组的数目计占56%。

在调查的60个单位中，具有高级职称的教授，有教授，研究员，付教研员和高级工程师共241名，他们在各种不同行业的分布情况如表2所示。

表2　从事复合材料力学的专家教授的分布情况

高等院校					研究所或设计所				
航天	航空	汽车	船舶	其它	航天	航空	汽车	船舶	其它
18	2	2	5	56	11	32	0	1	49

其中航空航天的专家教授有128人，占53.1%实际上“其它”类中，还有一些同志在从事航空航天工业方面的研究，如大连理工大学，哈尔滨玻璃钢研究所都是在过去几年中竞争中的获胜者，所以航空航天方面的专家教授的比例还要更大。国外的复合材料的应用也集中在航空航天工业方面，1987年西方国家的复合材料在航空航天工业上的应用占40%。在1996年之前预计将以14%速度递增，到1996年，其应用将达到$\frac{1}{3}$。

在民用产品上应用复合材料的势头越来越明显，但是成本一直是发展的主要障碍。国内引进的，或正在谈判引进的SMC生产线，管道生产线已为数不少，值得担虑倒不是应用的问题，而是发展起来之后原料是否能跟得上供应的问题。在原料国产化的过程中，除了材料之外，还有不少是复合材料力学的问题。

所调查的具有高级职称的同时的研究方向分布，可用上列数字来说明，数据中的小数之所以出现是因为有的同志的研究方向不止一个，所以不得不用平均人数来表示。

表3　不同研究方向的高级职称人员的分布

研究方向	人数	研究方向	人数
1. 力学性能及其表征	17.98	11. 应力波传播特性	1.67
2. 撞击、瞬时加载下的性能	12.20	12. 热性能	1.34
3. 强度	36 65	13. 结构分析	51.1
4. 损伤	10.77	14. 层间应力	6.90
5. 断裂	14.95	15. 固化过程中的力学问题和残余应力	4.64
6. 疲劳	13.80	16. 界面力学	17.45
7. 蠕变和粘弹性	6.00	17. 无损探伤	0.6
8. 塑性	0.60	18. 连接	9.30
9. 实验方法	4.00	19. 设计	23.43
10. 温湿影响	7.55		

其中有关力学性能（第1至第12项）的参与人数是127.62人，结构分析和层间应力的参与人数是58.06人，后者是前者的45.6%，1987年第6届国际复合材料会议（ICCM-6）论文集中有关复合材料性能方面的文章篇数有下列统计：

力学表征	12	长期强度	8
撞击性能	11	蠕变和粘弹性	6
损伤机理	8	热损伤和腐蚀	4
断　　裂	29	热效应	5
疲　　劳	13	磨　　损	7

共计103篇，而论文集中有关结构分析只有18篇。层间应力只有6篇。两者之和是力学性能文章数的17.08%。如果考虑论文集中的陶瓷基复合材料和金属基复合材料方面的有关力学性能的文章，结构分析和层间应力的文章的比重比这个数字还要小。结构分析的人数多恐怕是我国复合材料力学界的一个特点，另一个特点是在ICCM-6和33届SAMPE会议上有大量热塑性基体，高温热固性基体和陶瓷基体的复合材料的力学性能研究方面的文章，而我国复合材料力学界在这三个方面至今很少看到有关的研究报导。这主要是因为我国复合材料界在这三个领域内的新材料研制还没有达到实用阶段，所以还没有延请复合材料力学工作者参与研究的需要。这个例子又进一步证明了如果没有材料和生产实践的推动，复合材料力学的发展就没有动力。换言之，如果复合材料力学工作者离开了材料的生产实践的需要，很难有所建树。

三、固体力学所处的状态和我国复合材料力学界在发展复合材料中应起的作用

众所周知，固体力学是在为生产实践服务中发展起来的。水利工程，土木建筑和机械制造工程都曾经是推动其发展的强大动力、到了20世纪航空航天工业的蓬勃发展把固体力学提高到一个空前未有的水平，出现了很多新的分支：实验力学，计算力学，断裂力学，复合材料力学，生物力学，爆炸力学等等。足见工程实践向固体力学提出了越来越多的需要。

可是奇怪得很，我国的固体力学同行碰到一起的时候，就哀叹固体力学越来越不景气，课题太少，科研经费不够用，甚至出现了毕业生找工作难的现象。再看看国外的情况，譬如美国很多大学里很少设有力学系。如果你再深入了解一下，发现明明是力学课程占主要地位的系，但名字却是：航空航天系，基础工程系或者叫工程科学系、有些虽然也用“力学”的字眼，但却是附在机械系，冶金系或者别的什么系里、据说这也是因为如果说自己是力学系毕业生就找不到工作的缘故。为什么力学竟落到这么一个地步？当初在30到50年代，力学又为什么那么吃香？实际上，如果翻阅一下力学发展史，就可以发现每当力学工作者热衷于学院式研究时，必然会落到孤芳自赏的处境。30—50年代，力学界出现一段鼎盛时期，很多人认为应该归功于Felix Klein。他原来是一个纯数学家，他在1893年到美国参加在芝加哥举行的国际博览会，并在美国作了一番考察，对美国的丰富资源和得天独厚的自然环境留下十分深刻的印象。他回德国之后鼓吹如要与美国匹敌，除了发展应用科学别无他途。他在盖丁根大学创建了应用力学，应用数学和技术物理三个教研室，并积极与工业界合作。在20年代末和30年代初，有大批受他影响的学者纷纷移居美国，Karman是其中的一个。他们到了美国说服工程界用应用力学可以解决他们的工程问题。同时对当地的纯数学家说，数学并非科学的皇后，而是科学的婢女，应该放下架子去伺候科学。这批科学家和他们的学生后来真的

为力学，更重要的为航空航天业立下了不朽功勋。

从50年代开始计算机逐渐商用化，伴随着计算机的发展，计算数学和计算力学也飞速发展了起来。另一方面人类知识以爆炸的速度在扩展，在积累。1950年至1985年的35年中，积累的知识是人类历史上积累的知识总和的95%。新能源、新材料，近代物理装备起来的新技术、新工艺使人们的知识结构不断更新。科学分支之间重新组合，在边缘地带出现新的分支。这一切不可能对固体力学整体没有一点冲击。譬如工程界拥有功能齐全的通用计算机程序之后，毫不费力地“侵”入了固体力学的应力分析这个世袭领地。在这种形势下，固体力学工作者理应解放思想，走出传统领域，熟悉邻近的领域，占领新的阵地，在中间地带谋求突破，迎接固体力学的新的开拓期，让固体力学在生产实践的战斗历程中形成新的面貌。

但是这个转变肯定需要一个过程，需要克服一些传统观念。就以应用数学在固体力学中的地位为例来说明心理障碍是客观上存在的。我们知道数学是力学的“天然盟友”，没有数学，力学问题就没有工具求解（图2）。应用数学在固体力学的发展中曾经有过不可磨灭的功劳。但是久而久之，人们把固体力学中的解析数学工具和理论混为一谈。经常听到有人说某某是“搞理论”的，某某是“搞实验”的，这里所谓搞“理论”的，实际是指“搞解析数学”的。本来数学和实验是建立固体力学理论的两个不可缺少的工具，但是却误解为“数学”工具就是“理论”，怪不得“实验”似乎就不需要了。这不但有其历史和客观条件的原因，而且还有主观上的原因。

复合材料损伤之后的力学模型尚未真正建立起来。如果不能反映损伤后的复合材料的本质，即使用再高深的数学工具也没有用。损伤之前的复合材料可以看成线弹性各向异性材料，其结构分析问题，大多数可以用通用程序求解，对于那些用计算力学无法保证精度或费机时太多的工程问题还得用传统的应用数学来解决。但这已经不再总是发展生产的关键。作者认为我国有过多的专家教授挤在这一个狭长地带，肯定会出现粥少僧多的现象。建议留下一小部分确有实力的同志继续这方面研究以外，其余的同志是否应该分散到其它方面去。或者跟工厂，设计所合作，用计算力学帮助解决一些难题，或者去从事生产实践中需要的，但目前还没有很多人作的研究工作。例如固化过程中的力学问题，包括残余应力，固化之后的室温下的几何形状的研究，长期强度，腐蚀，甚至磨损等问题。这些方面的研究至今在国内还很少，甚至有的是空白。

要作到这一点，也不容易。主要的心理障碍是认为这些问题并非属于固体力学的本职工作，或者认为要偏离原来的研究方向，有一定程度的改行，但是知识更新的周期越来越短，“活到老，学到老”不再是少数模范人物的难得的德行，而是每一个普通人的必须，今后一辈子搞一个研究方向怕很难作到。

还有一个思想障碍是认为结合生产实践搞科研，水平不会太高。但是要知道，一个学科的发展要经历两个时期，即开拓期和成文期。在开拓期内的学科显得生龙活虎、衡量其研究工作水平的标志是学术思想是否能有效地解决实际问题和思想是否具有创造性、在成文期内，衡量其研究工作水平的标志是要看是否有助于理论体系的完善。目前复合材料力学处于开拓期，力学模型尚未建立就要求其理论体系必须完善，无异是缘木求鱼。

作为认为从事复合材料力学工程的同志自己应该认识它的特点，同时也希望旁邻学科的工作者也能了解我们这个复合材料力学的特点，以便在共同的认识的基础上进行富有成效的合作。