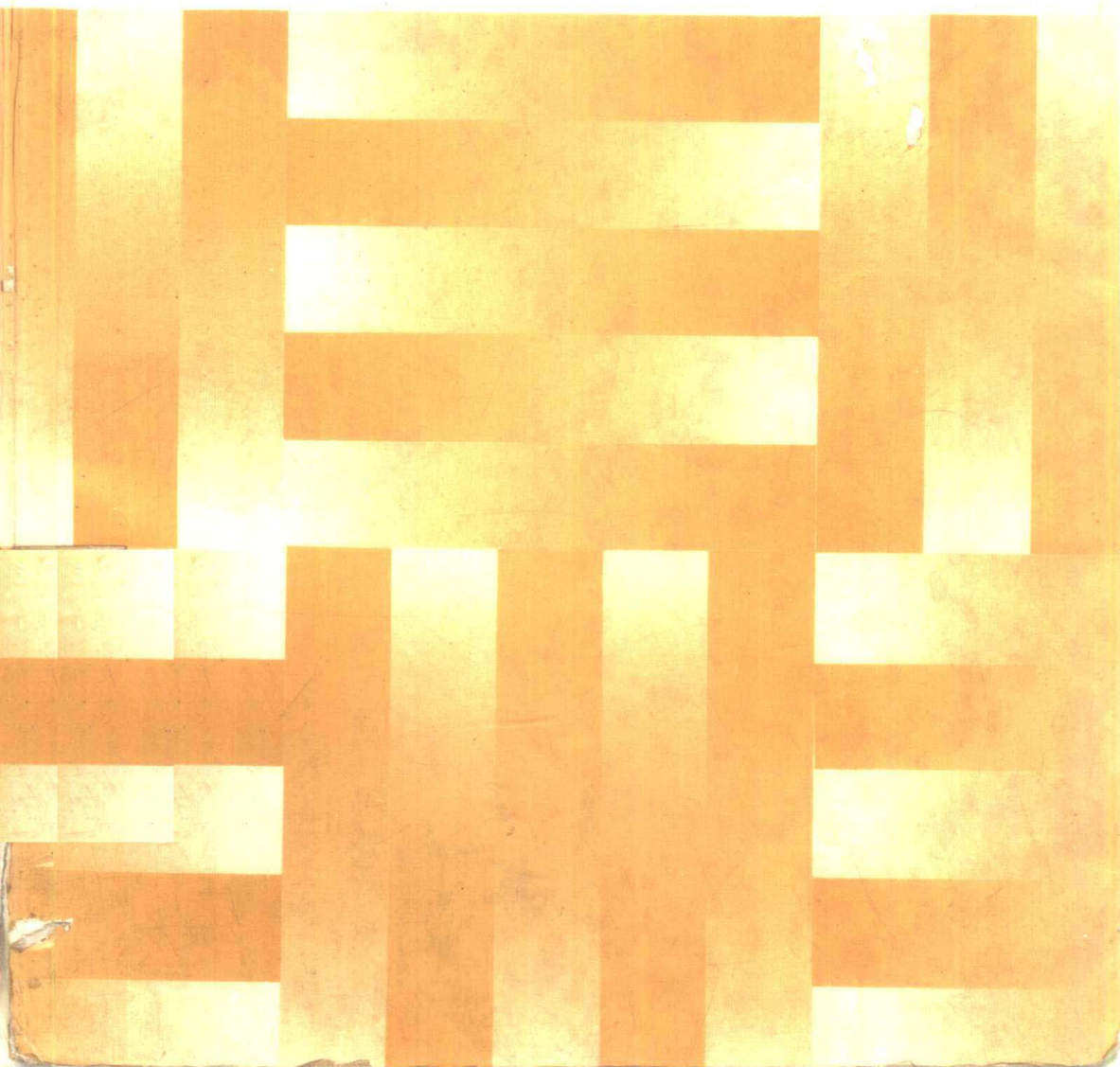


短纤维复合材料力学

DUANXIANWEI FUHECAILIAO LIXUE

顾 震 隆 编 著

国防工业出版社



短纤维复合材料力学

顾震隆 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书是有关短纤维复合材料力学的专著。是作者根据近年来所做的大量科学研究工作和参考国外有关文献编写而成。

其主要内容有：短纤维复合材料的制造方法及其力学性能、应力传递理论、模量和强度的理论预报、短纤维复合材料的疲劳和断裂、受硬物撞击的动力响应和损伤表征。

书后列有 300 多篇参考文献，供读者查阅；附录中载有材料试验的方法、设备和有关的标准，以供读者参考。

本书可供从事复合材料研制和结构设计的有关工程技术人员、复合材料力学工作者参考，也可作为有关专业研究生的教材。

短纤维复合材料力学

顾 震 隆 编著

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京丰华印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张12⁵/₁₆ 325千字

1987年7月第一版 1987年7月第一次印刷 印数：00001—2650册

统一书号：15034·3284 定价 3 10元

前 言

目前复合材料正在发展之中，其中短纤维复合材料的发展，更是突飞猛进。因为它比连续纤维复合材料的模压性能好，便于自动化生产，从而降低成本。使它在民用工业中，甚至在人民的日常生活中的应用有了可能。

短纤维复合材料已开始作为结构材料在汽车、火车等交通工具中使用。它具有连续纤维复合材料所没有的力学特点，最近在这方面的研究工作吸引了很多学者。其文献数量的增长速度，实在令人吃惊。编著者用计算机检索最近10年中的文献，就找到1000多篇。实际上还有很多文献并未包括在内。

连续纤维的复合材料力学已有几本很出色的论著，其中有适于大学生或研究生用的教材，但是国内外还没有一本短纤维复合材料的专著。三年多来，作者在哈尔滨工业大学为研究生开设了这门课程。教学实践证明，短纤维复合材料的文献经过总结整理，已经可以写成一本专著。特别是短纤维复合材料力学包括很多基本问题，例如纤维和基体之间的力的传递机制、破坏机理、损伤等等，这是连续纤维复合材料力学中没有充分考虑过的。断裂、疲劳和撞击破坏等，反映出连续纤维复合材料力学所没有加以重视的一些问题。弄清这些问题，对于复合材料力学、以致设计和研制新的复合材料都有帮助，所以编著者决定把讲稿进一步修改之后，加以出版。

目前，国内已有同行在开始注意短纤维复合材料的发展和研究，而且在民用工业上应用短纤维复合材料已势在必行。实际上有些零部件，如火车窗框，已使用了短纤维复合材料。作为新兴材料，它一定会受到各行各业的重视。

本书适于从事复合材料的研制、应用和从事复合材料力学工

作的工程技术人员阅读，也可以作为研究生的教材。在本书后面列出了比较重要的文献目录，重点放在最近五年的文献，供读者查阅。最后还有一个附录，详细介绍目前在美国采用的短纤维复合材料的性能测试方法。实际上这些方法中多数对连续纤维复合材料也能适用。

编著者企图尽量用统一的观点，总结和阐述有关材料。但由于国内外过去还没有人做过这方面的工作，无可借鉴，所以难免有不当之处，希望读者不吝指正。

编著者特别要感谢美国普度大学航空航天学院的孙锦德教授，如果没有他的倡议、鼓励和对本书内容结构方面的有益建议，这本书可能是不会写成的。

编著者

1985年10月于哈尔滨工业大学

目 录

第一章	短纤维复合材料及其制造方法	1
1-1	绪言	1
1-2	纤维和基体	4
1-3	模塑工艺	9
第二章	短纤维增强复合材料的力学性能	20
2-1	绪言	20
2-2	SMC-R50 材料	26
2-3	试件和试验步骤	22
2-4	SMC-R50 的 试验结果和力学性能	33
2-5	单向短纤维复合材料	72
第三章	应力传递理论	92
3-1	用剪滞法分析应力传递	92
3-2	用有限元方法分析应力传递	103
第四章	模量和强度的理论预报	127
4-1	预报模量和强度的方法	127
4-2	模量的预报	130
4-3	短纤维复合材料的强度的理论预报	144
第五章	短纤维复合材料的断裂	151
5-1	SMC 复合材料的缺口强度	151
5-2	随机走向的短纤维复合材料的损伤和断裂之间的关系	159
5-3	随机走向短纤维复合材料的断裂力学	163
5-4	影响随机走向短纤维复合材料的断裂行为 为的几个因素	187
5-5	带有一定方向性的短纤维复合材料的断裂	197

第六章 短纤维增强复合材料的疲劳212

6-1 SMC 的疲劳裂纹和疲劳损伤的扩展213

6-2 短纤维复合材料的层间剪切疲劳性能的特征226

6-3 基体和界面性能对短纤维增强热塑性基体的
一些影响232

6-4 环境对短纤维复合材料性能的影响237

第七章 受硬物撞击的 SMC 的动力响应和损伤表征249

7-1 复合材料板材的接触定律249

7-2 SMC 板材受硬物撞击时引起的动力响应264

7-3 撞击损伤的表征、预报和剩余强度的预测281

7-4 不同撞击试验的比较312

附 录

A SMC 材料的 ASTM 试验标准的简单介绍321

B 双轨道剪切试验332

C 基体开裂试验337

D 确定 SMC 材料的树脂或/和玻璃纤维重量
百分比方法——烧成灰烬法339

E 有关单位换算系数340

参考文献344

第一章 短纤维复合材料 及其制造方法

1-1 绪 言

两种或两种以上的材料宏观地结合在一起而不发生整体的化学反应,即可形成复合材料。其组分材料的种类、数量、纤维方向以及其它参数可以自由选择,以获得所需要的性能。这些性能继承原来的组分材料的优点,从而使最后所得到的复合材料比一般的金属材料更轻,而且强度和刚度更高。复合材料种类很多,有颗粒增强复合材料、片状物增强复合材料、层板复合材料、纤维增强复合材料。本书仅讨论纤维增强复合材料。对于纤维增强的复合材料来说,纤维决定复合材料的强度、尺寸稳定性和耐热的性能。其它的如化学、电气、颜色和表面质量等性能是由基体材料所决定的。

30年代,已经在市场上可以买到制造玻璃纤维的设备。但实际应用玻璃钢是在40年代开始的,当时主要用在雷达罩上。60年代,复合材料有比较大的发展。在过去的十年里,工业的各个领域几乎都感到了复合材料的发展所造成的影响。最近其影响已波及日常生活。现在复合材料的制品已多达40000种左右。从飞机机身到钟表的齿轮和蜗杆,从能容纳几十万加伦盐酸的贮箱到钓鱼杆都可用复合材料来制成。我们可以列出一个很长的清单,来说明其应用的广泛程度,包括汽车、农业机械、家用电器、航空-航天工业、计算机、化工设备、建筑、电气-电子设施、海洋结构、搬运机械、娱乐用品和交通工具等等。

对于作为结构材料的复合材料来说,其优点是比强度高和比刚度高。这里比强度是 S/ρ , 比刚度(或称比模量)是 E/ρ 。 ρ 是

表 1-1 纤维和金属丝的弹性常数

性 能	E-玻璃	S-玻璃	铝	不锈钢	T-300	硼
比 重	2.54	2.49	2.71	7.9	1.74	2.52
拉伸强度 ksi($10^9\text{N}/\text{m}^2$)	500 (3.45)	700 (4.59)	42 (0.29)	347 (2.4)	325 (2.24)	500 (3.45)
S/ ρ $10^5\text{in}(10^3\text{m})$	54 (136)	77 (196)	9 (24)	21 (54)	49 (123)	54 (137)
杨氏模量 $10^6\text{psi}(10^9\text{N}/\text{m}^2)$	10.5 (73)	12.4 (86)	10.6 (73)	30 (207)	37 (250)	60 (400)
E/ ρ $10^7\text{in}(10^6\text{m})$	11 (2.9)	14 (3.51)	11 (2.81)	11 (2.80)	72 (18)	65 (16)

材料密度, S 和 E 分别表示材料的强度极限和杨氏模量。从表1-1中可以看出, 玻璃纤维、石墨纤维(实际上是碳纤维 thornel 300)和硼纤维的比强度和比模量要比那些金属丝的高出很多。还有一个主要优点是复合材料具有优良的可设计性。复合材料实际上是由组分材料所组成的形形色色的结构, 所以不但可以进行传统意义上的零部件尺寸的设计, 而且还可以通过选择其纤维的含量、层板的不同铺陈和其它参数来设计复合材料本身。除此以外, 还有很多其它优点, 如复合材料所制造的零部件在严峻的机械和环境应力作用下, 其形状尺寸都可保持稳定; 复合材料具有突出的电绝缘性能; 它们不会锈蚀, 现在有几百种树脂系统可供选择来对付几乎是任意的化学环境; 由于其成型简单, 可以用一次成型的模压件来代替那些本来需要复杂连结的组零件; 因为颜色可以直接铸进材料而不必进行油漆, 所以喷漆工序也可取消, 而且其着色还可以经久耐用。图 1-1 表示一种着色表面及其光洁度的反光照片, 与经七八次喷漆而得到的汽车车盖色泽相比毫不逊色; 最后无论采用什么制造工艺方法, 其工具费都只占整个成本的微小部分。

所有这些优点, 使成本-质量方面对人们具有很大的吸引力。

使设计工程师对复合材料产生越来越浓厚的兴趣，已不再犹疑不决。1980年在航天和其它结构领域内，碳纤维用了330t，芳纶纤维用了450t，硼纤维由于成本高，也用了大约23t。

在复合材料的发展早期，由于制造过程太复杂，而且是小批量生产，所以成本高，以致只有在军事工业中才可能使用复合材料。而为了使其成本下降，必须大批量生产，生产过程必须自动化。



图 1-1 SMC 汽车零部件上的平行线的反光照片

单向连续纤维增强的复合材料的一个显著特点，是在它的纤维方向有较高的强度和模量；但在垂直纤维方向里却很弱。如果一个零部件的应力状态可以精确地确定，就可以用单向层坯来设计成层板，使它与这个应力状态完全匹配。在这种情况下，单向增强复合材料具有优越性。但是如果应力状态无法预测，或者已经知道应力状态在各个方向受力基本相同，则采用单向增强的层坯来制造层板未必是最经济的。因为在这种情况下需要复合材料在各个不同方向里具有近似相等的强度。虽然可以用单向增强的层坯制成准各向同性的层板，但每一层内，譬如在弯曲时受力最大的表面层内，在垂直纤维方向里还是容易出现裂纹的。所以在这种情况下，每一层最好是各向同性的。而制造这种各向同性层坯的有效方法是采用随机取向的短切纤维作为增强物。

制造短纤维增强复合材料的另一个动机是想使制造过程自动化。大批量生产的模塑技术，如模压法和注模法，可以以很高的生产率制造出高精度的短纤维复合材料零部件。最近，采用由微

处理机控制的机器可以控制微量组分材料的重量,使其误差不超过0.5%,因此材料的各组分的含量均匀,从而使材料性能的标准偏差大大降低。制造工艺已经从纯经验的阶段进入了科学的阶段。材料性能的重复性很强,而且其工艺也将变得越来越自动化。

由于短纤维复合材料产量的提高,使其成本大幅度降低,则有可能进入民用市场。而在普通家庭广泛应用之后,又反过来刺激其进一步发展和降低成本。美国的聚脂模压板材材料(SMC)的销售量,有希望从1981年的一千万磅猛增到1985年的一亿七千万磅。这仅限于对汽车、卡车的外部零部件的销售量的预测。

本章将介绍短纤维复合材料所常用的组分材料(主要是纤维和基体)以及制造工艺。因为不同组分材料和制造工艺所制成的复合材料具有不同的力学性能,所以为了更好地理解以后几章的内容,本章内容是十分必要的。由于篇幅有限,本章将不涉及制造工艺中的化学反应和流变学的种种问题。

1-2 纤维和基体

一、纤维

纤维是以不同的形式在市场上供应的。不同的工艺过程,需要不同的纤维形式,如短切合股线、粗纱、毡、纤维末、编织物等。

高级纤维(硼、碳和芳纶)主要是用在连续纤维增强的复合材料中。然而,中等模量的石墨纤维在热塑性模压材料中也有应用。但在短纤维复合材料中用的最多的还是玻璃纤维。在本书以后的章节中,只考虑玻璃纤维的短纤维复合材料。

短切纤维有几种基本形式,可以供设计者选用。他们可以按成本、强度、与树脂系统的匹配和工艺过程等要求来灵活选择。不管短切纤维的最终形式如何,它们都是由连续纤维切成短切纤维的。而连续纤维都是在一个熔炉中把熔化的玻璃从导管中拉成很细的单丝,然后合成股线。

连续合股粗纱是无捻的股线，一般缠绕成圆柱形以便装运。粗纱表面经处理以便与不同树脂匹配，并在不同的工艺过程中被加工而不致受到伤害。

粗纱编织物是由连续股纱所制成的织物。在国外市场上可以买到各种不同宽度、厚度、重量和不同强度取向的织物。粗纱编织物可以使模压零件具有高强度，而其成本比一般的编织物要低。

细纱编织物是由捻过的细纱编织而成。它有不同的规格：包括不同性能、宽度、长度等，还有不同的强度分布方向。

图 1-2 表示玻璃纤维的有捻细纱、细纱编织物、连续无捻粗纱、粗纱编织物等。

增强毡是由短切的或连续的股线按盘绕的形式堆成 而用树脂定形。

面毡与增强毡或细纱编织物一起使用以提供一个面罩，使表面光洁、并掩盖下面的毡或编织物的花纹。面毡还可以用在耐腐

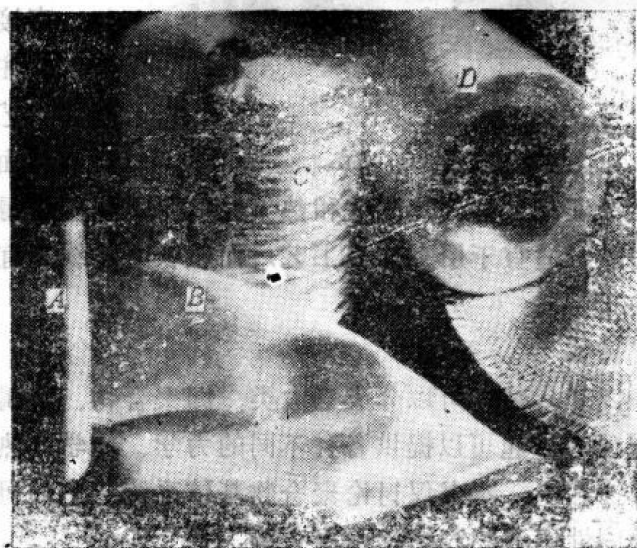


图 1-2

- | | |
|---------|----------|
| A—有捻细纱； | E—细纱编织物； |
| C—连续粗纱； | D—粗纱编织物。 |

蚀容器的里层，以提供一个含树脂较多的表面。

组合毡由一层粗纱编织物和一层短切股线毡粘结而成。它们形成一个很有效的增强物。它把两向的粗纱编织物与多向的短切股线毡结合在一起。这样，就可以节省时间，否则还得把两层分别铺陈起来。现在在模压时只需一次操作就可以了。

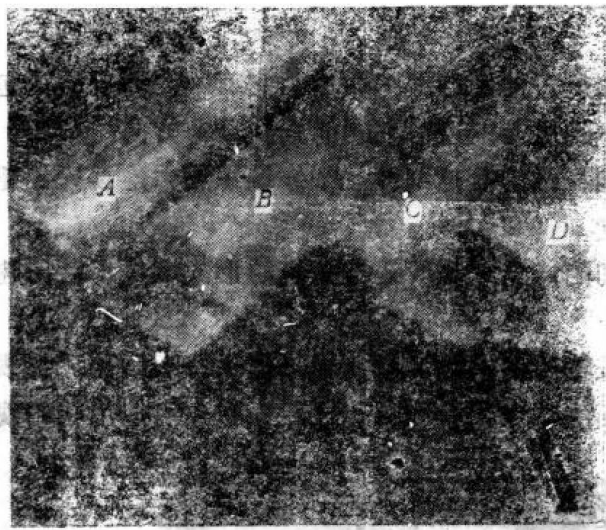


图 1-3

A—连续纤维毡；

B—面毡；

C—短切纤维增强毡；

D—组合毡。

图 1-3 表示连续纤维毡、面毡、短切纤维毡和组合毡。

短切纤维可以买到不同的规格，从 $1/8\text{in}(3.17\text{mm})$ 到 $2\text{in}(50.8\text{mm})$ 。它们与树脂以及其它添加剂拌和在一起，直接可以用于模压或注模工艺或其它工艺过程中。

纤维表面可以进行

处理以便保证与大部分热固性和热塑性树脂系统匹配得最好。较短的短切股线适宜于用在注模工艺，而较长的股线适宜于用在模压工艺过程。

二、基体

总的说来，基体可以分成三大类：即聚合物、金属和陶瓷。它们与增强物一起可以提供各种不同的力学、化学、热力学的性能和表面的性能。本书仅讨论聚合物基体系统，它们可以分成两类：即热固性聚合物和热塑性聚合物。

对热固性聚合物，加热通常是使复合材料零部件永久性成形并固定下来，其过程是不可逆的。

对热塑性聚合物，加热是为了在成形过程中把塑料熔化或软

化。冷却之后，其形状才保持下来。但是其形状并非一成不变，因为如果再加热，塑料还可以软化，甚至流动。所以成形过程是可逆的。

1. 热固性聚合物

热固性是由某一种特定的化学反应所引起的。这种化学反应使微小的单分子组成互相联结的大分子。为了进行这种化学反应，需要催化剂或固化剂以及施加能量（如热、微波等）。这种反应除与组分材料有关外，还依赖于树脂系统的时间-温度的平衡。在室温下，有时还需要加速剂，以增进其媒介作用。在固化时，本来不需加压，但是在很多场合下，加压可以提高表面光洁度、层板密度、零部件强度，同时也可以加速固化。抑制剂可以对固化周期作额外的控制，也可以延长树脂系统的保存期。由于热固性塑料形成三维的共价键网络，所以它是相当刚硬的。加热不能使之软化，因此聚合作用是不可逆的。如果温度太高，共价键会坏掉，从而使它降低强度以致破坏。

热固性塑料固化时，先是形成软的胶衣。结胶后，固化过程马上加速并发热。这个“释放热”可以相当高，应该加以适当控制。当复合材料完全凝结时，固化过程才结束。

最广泛应用的热固性树脂有聚脂、环氧、酚醛和聚酰亚胺等树脂。

聚脂的优点是同时具备高的力学性能、良好的化学性能和电绝缘性能。并且尺寸稳定，容易处理，成本也低。

特殊配方的聚脂胶衣一般是在手工铺陈和喷涂工艺中用来提供与型模相接触的表面光洁度；而且它还有防老化的功能。胶衣还可以着色，使模塑件具有所需要的任何颜色。但必须在铺陈和喷涂积层之前就喷到模面上去。

环氧种类很多，它可以呈粘性液体，也可以是高熔点固体。它们具有较高的比强度和较好的尺寸稳定性。它们对碱性溶剂的抗腐蚀能力比聚脂强。但是对酸的抗腐蚀能力较弱。它们的绝热

能力也很好。它们又是耐高温的理想材料，有些特殊的配方可以在 550°F (288°C)下工作。其收缩率小于2%。在固化过程中，没有水或其它挥发物产生，因此，环氧基体与增强物之间粘结良好，比较难以发生拔脱一类的破坏形式，在裂纹界面处不致发生纤维暴露在外情况。不同的环氧有不同的固化温度，从 $5\sim 180^{\circ}\text{C}$ ($41\sim 356^{\circ}\text{F}$)不等。因为它有很大的选择余地，所以其最大优点是可以选择不同的树脂、不同的固化剂和改性剂以满足不同的应用要求。环氧的价格不象聚脂那样便宜，但是在关键的应用场合下，它的性能可以在很大区间内变化，从成本-质量的角度来看，成为最优先考虑的因素。另外它还可以与阻燃剂、颜色和其它添加剂物一起使用。

酚醛在固化时要经历几个阶段。初始阶段是凝聚阶段並生成水，加热后酚醛从可熔的热塑性材料变成硬的不可熔的热固性聚合物。酚醛可在高温下使用，温度可高达 300°C (572°F)。在所有热固性塑料中，酚醛是最便宜的一种。

聚酰亚胺通常在高温条件下广为应用。这种性能是来自它的链-环结构所具备的刚度。虽然这种刚度的增加会提高它的强度和模量，但是它很脆，对裂纹扩展的抗力较低。另外这些聚合物在固化后有较大的热收缩率。

环氧、聚脂和聚酰亚胺的典型性能表示在表 1-2 中。

表 1-2 几种基体材料的典型性能

性 能	聚 脂	环氧树脂	聚酰亚胺
比 重	1.28	1.11	1.90
拉伸模量 $10^6\text{psi}(10^{10}\text{N/m}^2)$	0.51(0.35)	0.5(0.34)	4.5(3.1)
剪切模量 $10^6\text{psi}(10^{10}\text{N/m}^2)$		0.2(0.14)	
拉伸强度 $\text{ksi}(10^8\text{N/m}^2)$	7.97(0.55)	5(0.34)	28(1.93)

(续)

性 能	聚 脂	环氧树脂	聚酰胺
压缩强度 ksi(10^8N/m^2)	20.3(1.46)		41.9(2.89)
波 桑 比		0.4	
延 伸 率	2%	10%	
热膨胀系数 in/in·°F(cm/cm·°C)	55.6×10^{-6} (100×10^{-6})	32×10^{-6} (57.6×10^{-6})	8×10^{-6} (14.4×10^{-6})
导热系数 Btu/h·ft·°F (kcal/h·m·K)	0.116 (0.17)	1.7 (2.5)	3.59 (5.34)

2. 热塑性聚合物

与热固性聚合物相比,热塑性材料正相反,没有刚硬的网络结构,只有线性的分子链。当温度提高到玻璃转变温度时,热塑性材料就变软,其粘性随温度提高而降低。当冷却时,热塑性材料又获得其强度。在高温下,聚合物的共价键破坏,树脂被分解,因此热塑性树脂只限于在较低温度下使用。在模塑材料中用的热塑性材料有尼龙、聚乙烯树脂和聚苯乙烯树脂等。它们可以以溶剂、粉末和颗粒的形式供应。热塑性基体的复合材料的优点是:比较容易加工,比重低,低的导电性和导热性,耐腐蚀性等,因此更使人们感兴趣。用热塑性基体作复合材料时,纤维含量一般较低,所以强度和刚度较低。但是它的一个突出优点是成型性好,因而适用于生产率较高的工艺方法。

1-3 模塑工艺

一个设计工程师可以选择很多模塑方法。每一种工艺在形状、生产率、增强物和适用的树脂系统等方面,都有其优点和限制。在很多情况下,增强物和树脂系统是由最后的应用要求来选择的,而且往往只有一种工艺方法最为合适。然而在大多数情况下,设计者还是有很多选择的余地。下述列举的各种工艺方法的

优缺点，可以帮助设计者作最后的选择。

1-3-1 闭合模塑法

当零部件比较重要，而且要求两面都达到一定的光洁度时，则可用闭合模塑法。闭合模塑法分两种：即热模塑法和冷模塑法。模压、注模、压力袋等方法属于热模塑法。冷模压、冷锤、共形法等属于冷模塑法。

一、热模塑法

模压法适用于模塑形状复杂而强度高的零部件。对相当大的零部件用此方法，可以得到非常好的光洁表面。此种方法一般适宜采用热固性树脂。图 1-4 所示型模安放在水压机或改造的模压机上。

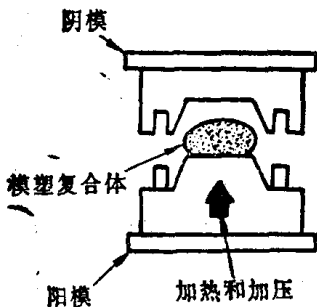


图 1-4 模压法

一个称重的装料放在下模上，装料可以是掺和好的各组分材料的复合物，也可以是纤维毡。添加树脂到毡上，然后闭合上下模，并加热加压。温度可以选择在 $107\sim 160^{\circ}\text{C}$ ($225\sim 320^{\circ}\text{F}$) 之间；而压力可在 $10.5\sim 140\text{kg}/\text{cm}^2$ ($150\text{psi}\sim 2000\text{psi}$) 区间内选择。根据零部件的厚度、大小和形状，固化周期可以

从大于一分钟到大约五分钟之间变化。最后把上模打开，取出制造好的零部件。

与其它的模塑法相比，这种工艺方法可以提供质量最均匀的零部件，而且生产率也最高。嵌入件和连接件可以直接模塑在里面，染色和表面光洁度要比其它工艺方法的好，而且事后修边之类的机械加工量极少。

模压工艺的最典型产品是 SMC(板材模压复合材料)和 BMC(块状模压复合材料)。

板材模压复合材料是由热固性树脂、填料、纤维增强物和根据产品质量要求而定的添加剂所制成，SMC 通常都用聚脂和玻