

复合材料设计的原理与实践^{*}

张双寅

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 对复合材料设计的原理与实践进行简要介绍, 对其研究现状与发展趋势进行评述。重点在于工程结构复合材料, 特别是航空航天领域应用的先进复合材料, 重点是仿生与机敏材料设计, 材料设计的目的是实现材料性能优化。

关键词 复合材料 强韧化 材料设计 仿生材料 机敏材料

古人类学与考古学的大量研究成果表明, 人类社会文明的发展和材料科学技术的发展紧密相关。用于社会生产的材料每一次重大革新和进步都使人类社会文明向前发展一步。所以, 史学家采用各历史阶段的材料对不同历史阶段命名, 如石器时代或铁器时代等。自19世纪以蒸汽机发明为标志的工业革命到现在的200多年的历史事实也表明, 工业生产力的发展和科学技术的进步更离不开材料科学技术的发展与进步。因此, 可以毫不夸张地说, 材料是现代社会和科学技术发展的物质基础与先导。

材料设计是新材料研制与开发的重要环节, 对材料科技发展具有重要意义。虽然“材料设计”这一术语在近20多年才常为人所见, 但从远古时代人类开始使用材料起就自觉与不自觉运用和实践材料设计这一概念。随着科学技术的飞快发展, 人类进行材料设计的意识与自觉性日益增强, 特别是近年来, 与材料科学相关的许多学科(例如物理、化学、力学、冶金学、计算科学)与技术(显微测量技术、材料制备技术等)取得突飞猛进的发展, 使材料设计不仅是一种愿望, 更成为一种现实。我国“九五”期间高科技研究发展计划即863计划中关于新材料的863-715主题明确规定了第12主题为“材料的微观结构设计与性能预测”。

复合材料具有各向异性和非均匀性, 其最大特点是可设计性。复合材料设计的内容很多, 本文仅扼要地从几个不同角度、不同内容分别进行讨论, 重点评述仿生材料与机敏材料的发展状况。

1 复合材料设计

1.1 纤维复合材料的优化设计

复合材料的一个主要优点是它的可设计性, 结构设计师可以根据结构的受力状况在设计结构的同时也进行材料设计, 充分利用它的优点, 而回避它的缺点。通过选择组分材料(纤维和基体)并根据复合材料的受力状况对纤维进行铺设, 选择铺层角度、铺设顺序与铺层层数, 以达到优化设计和等强度设计的目的。通常, 单向纤维复合材料沿纤维方向具

1998-04-10收稿, 1998-07-13收修稿稿

* 国家自然科学基金资助项目

有高强度, 而其横向强度则较小。根据这个特点结构设计师们总是把纤维方向设计为第一主应力方向。例如, 开采石油的玻璃钢抽油杆的最主要受力(或唯一受力)方向是轴向, 于是制造抽油杆时将绝大多数玻璃纤维沿轴向布置。与此对照, 离心式碳纤维/环氧树脂材料铀分离机的圆柱桶状转子, 所受最大应力是环向应力, 所以, 碳纤维总是多沿环向布置。对于飞机机翼和直升机旋翼这些受力复杂的构件, 常采用层合板结构, 层合板(又称叠层板)复合材料通过铺层方向、铺层顺序、铺层厚度(层数)的变化可提供丰富灵活的可设计性。一般的叠层板复合材料有如式(1)的本构关系^[1]:

$$\begin{Bmatrix} N_i \\ M_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{ij} & B_{ij} \\ B_{ij} & D_{ij} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon \\ \kappa \end{Bmatrix}$$

式中, N_i 和 M_i 分别为板中面内力和截面弯矩, ϵ 和 κ 分别是中面应变和板面曲率, A_{ij} , B_{ij} , D_{ij} ($ij = 1, 2, 6$) 分别是面内拉伸刚度矩阵、拉弯耦合刚度矩阵与弯曲刚度矩阵。

纤维复合材料层合板与传统金属板材有很大不同。首先是拉弯耦合刚度 B_{ij} 的存在; 第二是拉剪耦合刚度 A_{16} , A_{26} 和弯扭耦合刚度 D_{16} , D_{26} 的出现。这些大大地增加了材料设计的灵活性。以飞机机翼和直升机旋翼的设计为例, 由于受拉伸、弯曲与扭转的联合作用, 设计时必须考虑 B_{ij} , D_{16} , D_{26} 的耦合效应; 机翼总是受弯矩与扭矩的联合作用, 在一定气流速度与机翼攻角下机翼会发生颤振, 造成飞行不安全。设计师可以利用弯~扭耦合的特性, 对机翼铺层结构进行剪裁, 使之具有这样的特性: 当弯矩增大时, 耦合扭矩使机翼攻角减小, 可大大减小颤振发生的可能性。

所谓“超混杂复合材料”是先进航空复合材料优化设计的突出例子, 由纤维增强高聚物复合材料与金属板复合而成。例如, 芳纶复合材料与铝板复合成的 ARALL, 碳纤维与铝的层压板 CALL, 以及维尼纶纤维/铝的 VIALL 和玻纤/铝的 GLALL (或 GLARE) 都是超混杂复合材料。这类层合板, 薄铝板在外层, 不仅具有强度大、刚度大的优点, 尤其耐疲劳性能与抗冲击性能好。其中 ARALL 与 GLARE 已商品化, 两种 ARALL 已分别被采用制造 Fokker-50 型飞机下翼和 Douglas 飞机公司的 C-17 军用飞机大开口舱门^[2], 其耐疲劳性能^[3]与抗冲击性能^[4]好。此外, 国外与我国已采用 ARALL 制造防弹头盔。

1.2 复合材料的界面设计

界面性能对复合材料综合力学性能影响极大, 通过改善界面性能可以大大提高复合材料综合力学性能, 这就是“界面工程”。复合材料种类很多, 例如, 有树脂基、金属基和陶瓷基复合材料。界面设计或界面工程内容很丰富, 很复杂。界面对材料强度与韧性的影响极大, 一般来说是, 界面结合强度越高, 复合材料的模量越高。至于界面强度对复合材料的强度和韧性的关系却不这么简单, 譬如, 聚合物基复合材料界面强度提高有利于复合材料强度的提高; 而金属基复合材料则不同, 如碳/铝材料, 当界面强度适度时复合材料强度最大, 而界面反应太大, 界面强度变大, 复合材料强度变小。这是由于太大的界面反应, 损伤了纤维强度。为克服这一问题在增强剂上涂层以改善界面浸润性又可防止过分反应。例如, Al/C 复合材料在碳纤维表面涂 TiB 层, 在 C/Mg 复合材料涂 SiO₂, 对 B/Al 用 SiC 涂层。研究表明^[5], 对 T300 碳纤维表面用化学气相沉积(CVD)法涂上 C—SiO₂ 涂层(呈梯度

变化),可大大改善 C/Mg 界面性能 关于界面强度对韧性的影响,情况更为变化多样;无论何种基体,适当的界面强度给出最优的材料韧性 复合材料主要的细观增韧机理为“界面脱粘”、“裂纹桥联”、“纤维拔出”和“裂纹拐折”等 高的断裂强度与高的断裂韧性往往是两个相互矛盾又相辅相成的参数,二者的恰当匹配是提供最优材料设计的途径 为了获得适当的界面强度,采用对莫来石纤维表面进行双涂层处理,使纤维易于从莫来石基复合材料中拔出,提高复合材料的断裂能^[6]。

对纤维进行表面处理是改善界面性能的最重要、最常用的方法 熟知的界面粘结理论^[7,8]有:(1)表面形态理论(或称机械结合理论);(2)官能团理论;(3)表面能理论 提高界面结合强度的方法很多,对于玻璃纤维通常需要进行表面处理,以增强界面结合强度,改善防水性 常用的偶联剂有机硅烷和甲基丙烯酸氧化铬^[7,8];对于碳纤维表面通常有几种方法^[8]:(1)氧化法:气相法(氧气,臭氧等氧化剂)、液相法(HNO₃等强氧化剂);(2)涂层法:又分有机涂层和无机涂层;(3)净化法:采用热解法将纤维表面净化

对某些颗粒复合材料,增加界面柔性层,减小应力集中,往往起到提高断裂韧性也不减小其强度的作用,例如,用橡胶涂层玻璃珠增强聚丙烯,就是一个成功的实践 受生物材料的启发,人们尝试了复杂的仿生界面设计 例如,在研制碳纤维增强金属基复合材料时,构造了多层逐步过渡的界面:包括由纤维到基体的 PC/A N/A l,PC/T N/T i,这里 PC 是热解碳

1.3 复合材料的仿生设计

生物材料从本质上讲就是复合材料,日久天长的自然进化使得生物材料具有最合理、最优化的宏细观结构;并且,它具有自适应性和自愈合能力 在比强度、比刚度与韧性等几个方面的综合性能上总是最好的 所以,研究生物材料可以对材料设计提供灵感与方法 1992年《SCIENCE》杂志发表了题为“新的材料加工战略:仿生学方法”的文章,提出“采用生物学原理研制新型材料”,指出很多生物组织是由生物矿物质复合材料构成的 生物生长过程中控制矿物的形成和生长以及复合材料微结构的发展,生命系统制造生物复合材料主要通过如下三个原则:(1)将“生物矿物化(biom ineralization)”过程限制在特定的子单元内;(2)产生具有一定大小和方向的特定矿物质;(3)将很多微小子结构组合在一起,形成完全设计好的宏观结构 这一过程简称为“生物矿物质化”过程,现在已有两本这方面的专著^[10,11] 当然,目前人们对生物矿物化过程的研究还很不成熟,但参照已知的生物材料生长原则,研制工程材料已取得实质性进展 以下是几个仿生设计的例子。

1.3.1 珠母贝材料的细观结构研究及仿贝壳材料研制 珠母贝材料是公认的轻质高性能生物材料^[12],它的结构与纤维复合材料不同,是由“砖”和“泥浆”堆砌而成,“砖”就是多角形霏石(aragonite)平板晶体,主要成分是矿物质-碳酸钙,体积含量约为95%;“泥浆”是由多糖(polysaccharide)与蛋白质微纤维组成,体积含量只有5% 贝壳生长过程中,将霏石(碳酸钙)沉淀在有机质基体上,形成层状结构 断裂试验和断裂表面分析表明^[13,14],这种贝壳的平行于横断面的断裂面呈阶梯状,比平行于多角形霏石小板表面的断裂面曲折得多 它的主要韧性机制是裂纹拐折、纤维拔出和基体桥联;霏石(aragonite)晶体片的滑动与有机体的塑性变形是它的主要塑性机理,它有很好的断裂韧性^[15]。

1.3.2 仿竹复合材料的研制 竹子是应用很广的生物材料,它轻且强度高 结构上有

明显特点, 纤维均沿轴向排列, 芯部有中空部分, 纤维沿壁厚方向由里至外逐渐加密, 这样大多数纤维分布在竹杆外侧, 十分有利于抗弯性能, 符合优化设计原理

1.3.3 仿骨设计 骨骼也是符合优化设计原理的生物复合材料。它除了具有象竹子的外强里弱的结构外, 骨骼的两端都有哑铃状粗大的圆头, 应力分析表明, 端部圆头具有增加抗拉性和与肌肉联结的效能, 不仅增加抗拉强度, 也增加断裂韧性。试验表明, 哑铃状短纤维比平直短纤维复合材料具有较高的抗拉强度与断裂韧性。

1.3.4 仿根设计 植物的根系具有多重分叉形。试验表明, 带根状端部的纤维比平直端部纤维较难从基体中拔出。简单的力学分析可以证明, 根状纤维比平直纤维具有较小的应力集中。有人设计研制了分形树(Fractal tree)状的增强纤维, 并研究了不同等级分形树增强相的增强效能^[16]。

1.3.5 螺旋状纤维束增强复合材料 受生物材料微观结构的启发, 用螺旋状纤维束制作增强树脂的复合材料, 其断裂韧性比常规平直纤维束的高很多^[17]。加工方法是: 在用纤维束制作预浸带(prepreg)之前, 先将纤维束加捻, 使其成螺旋状, 再按常规方法制成预浸带。

1.4 机敏材料(智能材料)设计

当前材料科学领域内的一个非常活跃的领域是机敏材料(Smart material)^[18], 或称智能材料(Intelligent materials)^[19-21]。主要的应用领域是航空与航天, 制成所谓智能结构。机敏材料是国际上最早出现的术语, 后来我国学者常称为智能材料; 其实, 当前此类材料还远未发展到“智能”水平, 称为机敏材料与机敏结构(也称为自适应材料和结构)更合适。机敏材料有很多种类, 这里只能简要分述如下。

1.4.1 形状记忆合金(Shape memory alloy(SMA))^[22] 形状记忆合金具有随温度与应力变化发生可逆相变(马氏体相变)的性能, 在相变后其刚性、电阻、内摩擦、声发射性能均将发生变化。这些可用来作为检测结构损伤的信息源; 此外, 将1%的钛镍(NiTi)合金丝(SMA)埋设于环氧树脂中制成形状记忆复合材料(Shape memory composite-SMC), 当机构发生裂纹时, 裂尖附近的NiTi丝伸长, 电阻率增大, 发出信号, 可以对裂纹或损伤进行自诊断^[23]。此外可以通过电流加热使SMA产生形状记忆收缩力, 从而减小应力集中, 使裂纹自愈^[24]。再者, SMA可被用于振动控制^[25]以及抗低速冲击设计^[26]。最后, 还应提及, 1970年美国将SMA用于制造宇宙飞船天线, 先在地面室温下把它折叠成5cm以下的球状体, 送入太空后利用太阳能使温度达到77℃, 球状合金丝打开恢复成抛物面形状。SMA除TiNi合金外还有CdAgCu合金。形状记忆合金的本构关系相当复杂, 大量试验研究和理论工作正在进行, 为节约篇幅不作介绍。

1.4.2 压电(piezoelectric)材料与铁电(Ferroelectric)材料 压电材料与铁电材料具有电~力互偶效应, 即在应力作用下会产生电压, 反过来受电压作用时能产生应力(与应变)。这种性能可用来制造成“传感器(sensor)”或“驱动元件(actuator)”。例如, 在纤维表面粘上一层聚偏二氟乙烯(PVDF)压电薄膜, PVDF可将结构变形转化成电压, 控制振动。再如, 将锆钛酸铅(PZT)颜料与双酚A型环氧树脂配成涂料, 涂在复合材料梁上可达

到消振、除噪的目的^[27]。Crawley 等最早研究了压电复合材料梁的弯曲力学行为^[28]；Im 等也进行了类似工作^[29]。压电复合陶瓷的断裂行为很复杂，Fulton 等研究了非线性行为^[30]。

1.4.3 光纤机敏材料(Optical fiber smart material) 光导纤维径细、质轻、柔韧性好，集传感器(sensor)与传输元件于一身。它具有响应频带宽、速率高、抗电磁干扰、有良好耐高温及抗腐蚀等优点。可用来测温度、测应变、测外力。具体应用有：(1) 光纤损伤感知元件：将光纤置入结构内，可检测损伤的发生与扩展，Hofer^[31]在飞机的长桁与蒙皮之间埋入光纤，检查胶结质量和失效情况；Measures 将光纤检测技术用于 DA SH-8 飞机上，检查机翼前缘蒙皮的损伤情况^[32]。(2) 光纤传力元件：飞机飞行中外力随时发生变化，利用高双折射光纤作为敏感元件，光纤在横向力作用下两正交偏振基模之间产生互偶效应，采用光外差干涉技术及光程扫描探测系统可确定横向力的分布与大小。(3) 光纤应变传感器：其原理为光纤受拉伸后拉伸应变与光纤中布里渊频移变化成正比。(4) 光纤温度传感器：在航天飞机复合材料蒙皮内埋入光纤网络，可测蒙皮温度分布^[33]。(5) 光纤神经网络系统：把光纤排布成网络系统，与高速电子计算机相联，当结构发生大损伤或裂纹后光纤信号发生变化，甚至中断，计算机对信号处理，判断损伤的位置与大小，以便作出应用的处置。光纤网络与计算机网络连用制成用途多样的神经网络系统。可用于空间飞行结构振动控制^[34]。

1.4.4 电流变体^[35, 36] 又称电流变液(Electro-rheological fluid)，是一类流变性能因电场而改变的特种流变体，将可电极化的细小粒子悬浮于电绝缘的流体中而形成的两相悬浮体系。它的粘性随电场强度的增大而明显增大，当电场达到某临界值时，会发生由液态向固态变化的相变，此变化是可逆转变，转变极为迅速，仅需几毫秒。由于改变电场强度，材料的粘性和阻尼发生变化，因而，自振频率随之改变。这个特性可用于汽车与转子系统的主动振动控制，例如，电流变液注入汽车离合器和转子挤压油膜阻尼器中，可以减小噪音，提高传动效率，便于控制^[37]。这一技术在本世纪80年代受到世界各国的重视，在汽车、机械、机器人、航空航天、控制工程中都有应用前景^[38]。

电流变液主要有含水型与非水型两种。含水型电流变液有硅油中的沸石，(Zeolite Er Fluid)、矿物油中的硅胶等；非水型电流变液有氧化烃油中的聚甲基丙烯酸钠、硅油中的涂有高聚物的金属粒子等。这类电流变液按粒子分类有金属导体、离子导体、半导体、高分子电解质。

此外，近年还发展了一种磁流变液材料，是将铁磁性微粉悬浮于流体中而形成的悬浮液。在磁场作用下，磁微粒沿磁力线有序排列，实现流~固转变，粘性和阻尼发生变化。此性能也可用于振动控制的目的。例如，四氧化三铁(Fe_3O_4)有机复合物磁流变液具有较强的流变活性，可望成为有价值的磁流变材料。

1.4.5 碳纤维复合材料的损伤自诊断 碳(石墨)纤维复合材料(CFRP)在外力作用下电阻增大，通过电阻变化可预测 CFRP 结构的损伤^[39]。周期性外力作用下初期电阻是线性变化，当载荷达到某一定值时电阻出现非线性，材料接近破坏时电阻急剧上升。

机敏材料与结构在航天技术中有极大的应用前景，空间飞行器有如下特点：(1) 结构轻且尺寸大，总体刚度小，容易振动；(2) 结构精度高，尺寸稳定性要求高，例如2m~10m

的大型结构要求位移精度不超过若干微米 (3) 运行速度快, 经常要调整轨道, 避让其他飞行器, 易造成振动 (4) 在孤立环境中的航天飞机与人造卫星等大型复合材料构件, 常规无损检测难以实施, 微小裂隙的累积可能导致灾难性破坏. 利用机敏材料自诊断与自适应特性控制振动, 防止裂纹扩展, 对空间结构意义重大. 计划在2002年建成的 α 国际空间站上将大量采用机敏材料. 这个空间站的主龙骨与6个舱段均由复合材料桁架构成, 重约330t, 翼展长约110m, 这样大型结构需分部分批运载上天, 然后在太空组装. 雷达天线, 将采用折叠状送入太空, 然后打开, 用形状记忆材料最合适. 压电材料、电流变体材料将用来减震与除噪, 光纤网络将用于诊断损伤分布与损伤程度. 由于机敏材料具有自适应特性, 近年兴起的“神经网络”技术在机敏结构故障诊断与结构自适应调整等方面作用相当引人注目. 机敏材料与结构的日益受人关注^[40], 促进了机敏材料的学术研究的兴旺, 1992年名为“Smart Materials and Structures”的国际期刊问世.

1.5 微结构及应力设计

微结构对材料力学性能影响极大, 含非晶相(玻璃相)的三晶窝点(Triple pocket)往往是孔洞与裂纹萌生之源. 郭景坤研究了陶瓷与复相陶瓷的微结构, 晶界对陶瓷材料力学性能的影响, 并提出晶界应力设计原理与意义.

晶界与相界应力系内应力, 它是由于不同相材料具有不同的热膨胀系数和模量, 因加工温度变化造成的. 对于颗粒与纤维增强复合材料, 相界面应力可用下式计算:

$$q_p = - \Delta T (\alpha_f - \alpha_m) \left[(1 + \nu_m) / (2E_m) + (1 - 2\nu_p) / E_p \right]^{-1}$$

$$q_f = - \Delta T (\alpha_f - \alpha_m) \left\{ \left[\nu_m + \frac{(1 + \nu_f)}{(1 - \nu_f)} \right] / E_m + (1 - \nu_f) / E_f \right\}^{-1}$$

式中, α_f , α_p , α_m 分别为纤维、颗粒与基体的热膨胀系数, E_f , E_m , E_p 分别为纤维、基体与颗粒的模量, ν_f , ν_m , ν_p 是泊松比, ΔT 是温度变化, ν_f 为纤维基体比.

晶界内应力对多晶陶瓷蠕变孔洞成核的影响很大^[41], 孔洞成核率:

$$\dot{N}_c = Y(Y_s, n_s, z, \varphi, D_b, \delta_b) \exp[-4Y_s^2 F_v / \sigma_c^2 K T] / \sigma_c \Omega^{2/3}$$

蠕变孔洞生长率:

$$\dot{R} = \frac{2\pi\Omega D_b h(\sigma_c - 2Y_s/R)}{K T} f(l/R)$$

可见, 残余应力 σ_c 越大 \dot{N}_c 和 \dot{R} 越大. 通过相图选择材料配方和烧结工艺, 尽可能使晶界应力为压应力, 不产生或少产生易于引起断裂的拉应力与剪应力.

测量晶界应力的试验手段有: 拉曼光谱法, 荧光光谱法. 在应力集中区光谱有峰值, 应变变化时荧光光谱峰发生偏移. 有的论文采用微波处理法调整界面残余应力的研究. 由于各组分材料对微波吸收快慢不同, 温度变化快慢不同, 通过不同加热历程, 达到消除有害残余应力的目的. 例如, Si_3N_4 -20% $\text{VOITC}(\rho)$ 复合材料在2.45GHz微波炉中处理, 表面温度为800℃, 保温5min, 使抗弯强度由55MPa提高到684MPa.

郭景坤 中国结构陶瓷研究的进展及其应用前景. 中国空间科学学会第四次学术年会论文集. 郑州, 1996, 109
郭景坤 陶瓷的晶界应力设计. 中国空间科学学会, 空间材料专业委员会, 94学术交流论文集. 桂林, 1997
孔向阳 陶瓷基复合材料微观应力分析与调控. '95材料第三届年会论文集. 成都: 中国机械工程学会材料分会, 1995, 220

1.6 材料的分子设计

材料成分与分子结构对材料宏观力学性能影响的重要性是人所共识的, 改变材料成分与分子结构以获得高性能材料称为材料的分子设计. 近年人们越来越注意采用混杂基体制造复合材料, 例如, 通过热塑性树脂和热固性树脂的共混得到半互穿网络 (SIPN) 结构^[8], 可有效地提高其与纤维界面的粘结强度; 聚砜树脂 (PSF) 与碳纤维界面粘结差, 采用双乙炔端基砜 (ESF) 与聚砜共混形成 SIPN 就可以提高界面粘结性能. 还应指出, 原位复合材料 (In Situ Composites) 亦属此类, 这里具有刚性链的热致液晶高聚物和热塑性树脂熔融共混, 在流动中热致液晶高分子刚性链被取向, 冷却时以超分子水平凝聚成微纤状微区, 这种材料又称分子复合材料.

在复相陶瓷的制备过程中, 也不乏在分子层次对材料进行设计的例子. 通过对氮化硅陶瓷的分子设计, 可以得到由 α 相与 β 相构成的复相陶瓷, β 相为针状, 对等轴状的 α 相基体起增强增韧作用. 这种陶瓷的微结构可以设计和控制^[42], 其强度与断裂性能与 β 相的含量形状比关系很大. 此外, 通过对陶瓷先驱体 (Precursor) 的组成与结构的设计, 得到纳米尺度分子级复合的陶瓷材料. 例如, 在有机硅先驱体中加入其他金属元素 (Ti, Ta, W, Mo, Si, TB_2 等) 热解时得到复相陶瓷: 聚碳硅烷 (CPS) + 钛酸丁酯 \rightarrow 反应 \rightarrow 含钛的聚碳硅烷 (CPS) \rightarrow 热解 \rightarrow SiC 纤维, 其组成为 TiC/SiC. 它耐热性好, 且改善了与金属的浸润性.

1.7 计算机辅助设计

近年, 计算机辅助设计在材料设计方面的应用越来越受到重视, 逐渐开始这方面的实践. 计算机模拟在材料设计中有很大作用^[43], 现在已建立了材料设计“专家系统”^[44]和“数据库”; 主要模拟材料结构与性能之间的关系, 也可模拟工艺与性能之间的关系. 以颗粒 (或晶须, 短纤维) 增强复合材料为例, 分散相、基体与界面层的物理性能 (模量和强度)、热性能 (热膨胀系数与热导系数) 和分散相的几何性状 (长细比)、大小、分布等参数对复合材料宏观性能的影响可以利用计算机模拟; 建立合理模型, 根据这些参数预测材料宏观行为, 如等效模量、屈服应力、破坏强度、破坏概率、裂纹扩展路径、温度应力等, 于是, 可以评价各参数对材料性能的影响. 在日本, 材料工作者对功能梯度材料 (Functional Graded Materials) 进行模拟, 以寻求热应力小的界面材料梯度. 这对材料设计师理性地选择材料组分与成型工艺大有裨益, 避免以往材料研制中的“炒菜”式的盲目性.

当然, 这里存在很大的困难, 主要是我们对复合之后各组分材料的性能不能准确了解. 一般来说, 组分材料在复合后由于耦合效应所致, 力学性能都发生变化, 我们只知道它们复合前的性能, 很难准确获悉复合后的情况. 再者, 界面层 (包括梯度材料) 的性能更是重要的; 然而, 界面层的性能至今仍不能准确测定. 所以, 目前计算机辅助设计还处于试验阶段, 必须与微观和宏观力学试验相结合才能对材料设计师提供可靠信息. 此外, 关于材料微结构与残余应力对材料强度与断裂性能有大的影响, 这是不争的事实; 但是, 现在尚缺乏定量化的分析, 对此认识大多停留在定性上或概念上.

2 结束语

材料科学技术与生物技术、信息技术和能源技术一起成为现代社会文明发展的四大

支柱^[45]。复合材料是重要新兴材料之一^[46]。材料设计是材料技术发展的必由之途。1985年日本出版了第一本材料设计方面的专著《新材料开发与材料设计学》。本文对复合材料设计原理和发展现状进行了扼要评述,由于材料种类繁多,涉及多种学科,内容非常丰富,本文只着重讨论了结构复合材料与力学性能相关的强韧化设计和优化设计。关于材料的光、热、声、电、磁等物理性能和化学性能,以及材料耐磨性能和润滑性能的设计均未提及。

参考文献

- 1 张双寅,刘济庆,于小霞等. 复合材料结构的力学性能. 北京:北京理工大学出版社,1992
- 2 Wu H F, Wu L L. M L-HDBK-5 design allowables for fibre/metal laminates: ARALL 2 and ARALL 3. *J Mater Science Letters*, 1994, 13: 582~ 585
- 3 Marissen R. Flight simulation behaviour of aramid reinforced aluminium laminates (ARALL). *Eng Frac Mech*, 1984, 19(2): 261~ 277
- 4 Sun C T, Dicken A, Wu H F. Characterization of impact damage in ARALL laminates. *Comp Sci Technol*, 1993, 49: 139~ 144
- 5 张琨,李华伦,商宝禄等. 真空铸造高强度C/Mg复合材料. *复合材料学报*, 1996, 13(3): 43~ 47
- 6 Hu J S, Chawla K K. Effect of SiC/BN double coating on fibre pull-out in mullite fibre/mullite matrix composite. *J Mat Sci Lett*, 1993, 12: 84~ 86
- 7 Hull D 著. 张双寅,郑维平,蔡良武译. 复合材料导论. 北京:中国建筑工业出版社,1989
- 8 曾汉民. 树脂基复合材料界面工程. 见:李恒德,肖纪美主编. 材料表面与界面. 北京:清华大学出版社,1990, 271
- 9 Heuer A H, Fink D J, Loraia V J et al. Innovative materials processing strategies: A biomimetic approach. *Science*, 1992, 225: 1098~ 1105
- 10 Lowenstam H A, Weiner S. *On Biomineralization*. Oxford: Oxford University Press, 1989
- 11 Mann S, Webb J, William S R J P. *Biomineralization: Chemical and Biochemical Perspectives*. VCH Publishers Weinheim, 1989
- 12 Addadi L, Weiner S. A pavement of pearls. *Nature*, 1997, 389(6654): 912
- 13 Jackson A P, Vincent J F V, Briggs D. Application of surface analytical techniques to the study of fracture surface of mother-of-pearl. *J Mater Sci Lett*, 1986, 5: 975~ 978
- 14 Jackson A P, Vincent J F V, Turner R M. The mechanical design of nacre. *Proc R Soc Lond*, 1988, B234: 415~ 440
- 15 Wang R Z, Wen F Z, Zhang H B et al. Observations of damage morphologies in nacre during deformation and fracture. *Jour Mat Sci*, 1995, 30: 2299~ 2304
- 16 Zhou B L. The biomimetic study of composite materials. *JOM*, 1994, 57~ 62
- 17 Zhang K. Biomimetic study on helical fiber composites. *J Mater Sci Technol*, 1997, 13: 1~ 4
- 18 Gandini V, Thompson B S. *Smart Materials and Structures*. London: Chapman and Hall, 1992
- 19 徐惠彬,仲伟红,田蔚. 智能材料的发展现状及应用前景. 见:张志民主编. 第九届全国复合材料学术会议论文集(上册). 北京:世界图书出版公司,1996, 675~ 681
- 20 冷劲松,刘彦菊,杜善义等. 智能复合材料的研究进展. 见:张志民主编. 第九届全国复合材料学术会议论文集(上册). 北京:世界图书出版公司,1996, 698~ 700
- 21 晏雄. 智能材料. 见:张志民主编. 第九届全国复合材料学术会议论文集(上册). 北京:世界图书出版公司,1996, 692~ 697
- 22 杨杰,吴月华. 现状记忆合金及其应用. 合肥:中国科技大学出版社,1993
- 23 古屋泰文. Utilization of shape memory alloy as an intelligent material. *非破坏检查*, 1993, 43(3): 157~ 162
- 24 杜彦良,景景旭. 主动探测裂纹和控制裂纹扩展的智能材料机构. *力学进展*, 1994, 24(4): 499~ 510
- 25 Rogers C A. Active vibration and structural acoustic control of shape memory hybrid composites: Experimental results. *J Acoustic Soc Am*, 1990, 88(6): 2803~ 2811
- 26 Paine J S N, Rogers C A. The response of SMA hybrid composite materials to low velocity impact. *J Intell Mater Syst Struct*, 1994, 5: 530~ 535
- 27 江草茂则. Piezocoating. *机械的研究*, 1993, 45(5): 602~ 606

- 28 Crawley E F, Luis J. Use of piezoelectric actuators as elements of intelligent structures. *AIAA J*, 1985, 23(10): 1373~ 1385
- 29 In S, Atluri S N. Effect of piezo-actuators on a finitely deformation beam subjected to general loading. *AIAA J*, 1989, 27(12): 1801~ 1807
- 30 Fulton C C, Gao H. Electrical nonlinearity in fracture of piezoelectric ceramics. *Appl Mech Rev*, 1997, 50(11): 56~ 63
- 31 Hofer B. Fiber optic damage detection in composite structures. *Composites*, 1987, 18: 309~ 316
- 32 Measures R M. Smart structures with nerves of glass prog. *Aerospace Sci*, 1989, 26: 289~ 351
- 33 川神裕志. 光纤分布型温度测定装置. *机械的研究*, 1993, 45(11): 85~ 89
- 34 杜善义, 冷劲松. 光纤智能化复合材料及其监控系统研究. *力学进展*, 1992, 22: 496~ 506
- 35 Whittle M, Bullough W A. The structure of smart fluids. *Nature*, 1992, 358(30): 373
- 36 Halsey T C, Martin J E. Electro-rheological fluids. *Scientific American*, 1993, Oct: 58~ 64
- 37 姚国志, 孟光, 方同. 电流变液的性能及其应用研究. *力学进展*, 1996, 26(4): 521~ 531
- 38 森下信, 三井纯一, 黑田洋司. 电流变液体及其在减振器上的应用. *日本机械工程学会论文集(C篇)*, 1990, 56: 928~ 934
- 39 Schulte K. Load and failure in CFGFRP composites by means of electrical resistivity measurements. *Comp Sci Technol*, 1989, 36: 144~ 150
- 40 Teboub Y, Hajela P. A neural network based damage analysis of smart composites beams. *Proc 4th AIAA/USAF/NASA/OASD I Symp on Multidisciplinary Analysis and Optimization*, 1992
- 41 Chen K S, Page R A. Creep damage development in structural ceramics. *Jour Am Cera Society*, 1993, 76(4): 803~ 826
- 42 Mamoru Mitomo, Naoto Hirotsuki. Microstructural design and control of silicon nitride ceramics. *MRS Bulletin*, 1995, 38~ 40
- 43 程兆年, 陈念贻. 材料设计中的计算机模拟. 见: *材料科学技术百科全书*. 北京: 中国大百科全书出版社, 1995, 110
- 44 陈念贻. 材料设计专家系统. 见: *材料科学技术百科全书*. 北京: 中国大百科全书出版社, 1995, 110
- 45 朱丽兰. 前言. 见: *材料科学技术百科全书*. 中国大百科全书出版社, 1995, 1
- 46 师昌绪. 材料科学技术. 见: *材料科学技术百科全书*. 中国大百科全书出版社, 1995, 1~ 12

Design Principle and Practice for Composite Materials

ZHANG Shuangyin

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract

A brief introduction to the design principle and practice is presented. The research status and development trend in these aspects are reviewed. Emphasis is placed upon the engineering structural composite materials, especially, for the advanced composites applied in the aeronautical and astronautical industries and for biomimetic materials and smart materials. The purpose for materials design is to optimize the materials properties, and to realize the optimum ratio of materials performance to their cost.

Keywords: composite materials, strengthening and toughening, material design, biomimetic material, smart material