

材料研究中的新动向

——复合材料的仿生探索

张弗天 冯汉保

(国家自然科学基金委员会材料与工程科学部,北京 100083)

[摘要] 本文介绍复合材料仿生设计的含意、研究内容、方法和实例。在国家自然科学基金支持下,我国在这一领域取得的成果已引起国际同行的瞩目。

1 复合材料显微结构设计的现状

复合材料制备科学的任务,首先是优化基体和增强体以及它们之间的配合,其次是发展经济合理且能保证材料性能的制备工艺。显然,前者是基本的,是首先要解决的问题,即寻找复合材料的最佳组织结构形式,并据此设计组分和结构。由于制备和使用传统材料的历史很长,对它们的强化、韧化、失效机理、制备和工艺性能等都有充分了解,所以复合材料显微结构的设计思想主要来自传统材料的有关知识。例如:金属基复合材料来自多相合金,陶瓷基复合材料来自粉末冶金产品,树脂基复合材料也有类似情况。但传统材料的显微组织比较简单,以多相合金为例,其强化相的形状是球、针、片状等,结构是单晶体;晶界或相界是平直的,结构亦不复杂;形变则通过晶体阵点的少许位移(弹性形变)和位错运动(范性形变)实现。对于承载而言,传统材料并非一种合理结构。例如,在界面处材料的受力状态和行为突变,致使破坏和损伤开始的问题很难解决。这是因为传统材料显微结构的形成是热力学规律作用的结果。从力学观点来看,它不尽然合理。另外,热力学规律还限制了人们对传统材料组织的调控能力。陶瓷和树脂基材料方面亦有类似例子。因此,以传统材料为规范制备的复合材料难以做到综合性能的良好配合,不能尽如人意是很自然的。

2 复合材料仿生设计的由来

生物体结构经过约 20 亿年的物竞天择优化,几乎是完美无缺的。在一定生态环境中的生物,必然具有最适宜该环境和最充分发挥其奇妙和复杂功能的宏观和微观结构。人类的许多创造发明是从模仿生物开始的。仿生学涵盖面极其广袤,很多难题都可以从生物体获得解决的钥匙。而把生物体构件的力学功能有选择地模型化,作为复合材料显微结构设计根据和思想源泉,据作者了解最早是在 1984 年中国科学院召开的材料科学规划讨论会上,由周本濂教授首次提出的,但当时并未引起重视。1987 年,在日本复合材料学会杂志《J. Japan Soc. Comp. Mater.》上,出现了“仿生设计”(Bionic Design)这一专门术语^[1]。但从 1985 至 1988 年发表的一系列论文中,只是分析了木、贝壳、骨、表皮等的成份,软、硬组织结构和受力状态,尚未以此

本文于 1993 年 3 月 9 日收到。

为根据设计人造复合材料^[2]。1989年,中国科学院金属研究所周本濂教授领导的研究集体,在国家自然科学基金支持下,把根据生物体显微结构及其力学分析进行的复合材料显微组织仿生设计、模型检验直至产品试制等,作为完整系统的科学与工程付诸实践^[3],并初见成效^[15]。

3 仿生设计的涵义和例证

每一种生物体的具体构件都是适应特定环境的产物。其最大优点是极为节约高效和用途专一性,且具有下述特点:

- (1) 特定的、不规则的外形,如骨骼;
- (2) 力学性能的方向性,如竹、木等;
- (3) 几乎所有生物体构件的截面都是宏观非均质的;
- (4) 显微组元(如纤维)具有复杂的、多层次的精细结构。

在现阶段,人们要求复合材料具有和传统材料相同的通用性,即宏观上应是均质的、方向性不强或无方向性,良好的工艺性能,并要求能按需要具有传统材料的优点。因此,仿生的任务不是、也不可能是单纯的复制。仿生力学分析的主要任务是以材料科学的观点考察和分析生物体的微观结构,找出导致优良力学性能的主要结构因素,然后进行测试、分析、计算、归纳,最终建立微观组织模型,以指导节约、高效的复合材料的设计和研制。

生物力学工作者早就注意到,生物体构件中的增强体通过它与基体的组合型式和它自身的精细结构,发挥其独特的增强作用。例如,纤维状增强体是在动物、植物、传统材料和复合材料中常见的。典型的生物纤维具有渐尖的末端,大的细长比,通常壁较厚,有很小的胞腔,由糖单元长链(植物)和蛋白质(动物)构成,具有最有效地发挥其功能的细微结构。如以承载为主要任务的木纤维的细胞壁略似于钢筋混凝土,其中有相当于钢筋的微纤丝,相当于石料的木质素和相当于水泥的半纤维素;以抗弯折为主要任务的竹纤维,其细微结构^[4]的强度高且很柔韧。又如,几乎所有的植物纤维都是细长的空心管子,故对于给定的强度和刚度要求,它所需的材料比实心杆少。现在建筑的最大高度是宽度的20—30倍,而许多植物可达50—100倍,小麦可达200—300倍。一根细长的麦秆,能支持比之重几倍的麦穗,其奥妙在于它是空心的,比一根同样重的实心杆的刚度大得多。在截面积相同时,空心管(外径 $5\mu\text{m}$,内径 $3\mu\text{m}$)比实心管的抗弯能力高出41%^[5]。

纤维增强体的形态和在基体内的分布排列方式也取决于生物体的多种功能要求。从力学观点看,在植物的皮部和韧皮部中的纤维成束形或呈环状分布,在木质部中纤维成群或分散存在,其方向与主轴一致,以适应在固定地点起支撑植物体和抵御不定向的外力作用;而树根为放射分叉状,越向远处,分叉越多、越细。其功能为固定树木位置,固结和抓牢土地,防止脱出,以及从更远处吸收更多养分;动物的骨板纤维则呈现螺旋状排列,使骨质有很高的强度和韧性;等等。

受上述部分结构的启示并对它们作了力学分析后,周本濂教授领导的研究集体主要进行了三方面工作。一是仿植物中增强纤维分布制作特殊或专用材料。例如,按竹材横截面的纤维分布模式制成的碳纤维增强树脂试样,其抗弯能力比增强体均匀分布试样高81%^[2];仿棕榈树茎制作的抗压壳体也已获得应用^[10]。二是在此基础上建立复合材料增强体与基体关系模型,并制备出相应样品加以验证。如竹节使竹材的抗劈强度和横纹抗拉强度分别提高59%和

88%^[6]；树根状纤维(分叉纤维)的理论和实验研究表明,它能阻止材料在断裂时的裂纹张开,纤维“拔出”力和功都随分叉角而增加^[7]。还应指出,生物体能够给出非常简单,意义却很重大的启示,但往往因为太简单太常见了,反而易被忽视。例如,具有地下球茎的植物不易被拔出,它启发了哑铃状(或串珠状)短纤维增强体的研究。理论分析和试验结果都证明:球状端部提高了纤维的承载比例和应力传递效率。在弱界面结合时,哑铃状短纤维增强复合材料的强度成倍提高。意义更为重大的是,它把增强体界面上的切应力转换成纤维球端上的压应力,再转换为纤维截面承担的拉应力,致使界面强度的重要性大为降低,这对于困难的复合材料界面强度问题,可能是一个根本的解决办法。现在,他们已制成分叉纤维,哑铃状短纤维和空心纤维^[8]正在研究制备中。三是初步探索了制备自愈合材料的可能性。

4 现阶段的任务和展望

复合材料的仿生设计研究工作刚刚起步。现在主要是引进生物材料的微观组织的复合形式,活跃设计思想,直至制造出新型复合材料。

(1)研究增强体的显微结构、形态、与基体关系以及强化功能,先确定其优化形态和显微结构,再制造出产品,现在已利用空心纤维和分叉纤维等制成碳纤维铝合金样品。

(2)模仿特定生物体的宏观与微观结构,制造用途专一的零件。一个成功的例子是制造水下机器人的抗静水压的壳体。水下机器人的可能工作深度取决于外壳的抗压强度。参照棕榈树茎,在管外缠绕加固的碳纤维增强铝管,其纵、横向抗压能力明显高于未增强铝管^[9],从而潜深度成倍提高。此类结构已获应用。显然,类似工作可以解决特殊零件问题。

(3)复合材料的创伤(损伤)自愈合。所有生命体对其自身的非致命创伤具有自愈能力。非生命材料的失效是一个逐渐积累的不可逆过程。在制造复合材料时,可以考虑将有修补功能材料也复合进去,在损伤一旦开始和发展时释放出来进行修补。如能成功,可用于很重要、且损伤和更换都很困难的场合,如空间站的构件上^[10]。

由于近代科学技术的发展,人们不仅可以利用电子显微镜观察材料的细观组织结构,还可利用隧道扫描显微镜观察到原子堆积的状态,这些都给仿生分析提供了有力的研究手段,促使国内外同行竞相使仿生分析“更细更微”。而周本濂研究组独辟蹊径,按“宏—微—宏”的研究思路,在仿生设计方面抢先了一步。他们的工作已在国际同行中引起积极反响。该项目负责人应邀先后在奥地利塞伯多夫的“国家研究中心”和维也纳材料科学研究所讲学和作学术报告。在联合国工业发展组织(UNIDO)的“科学与高技术中心”举办的国际复合材料研讨会作大会专题报告^[11]。在国际精细陶瓷学会1992年学术会议作特邀报告^[12]。应D. M. Ștefanescu教授邀请,担任了1993年10月在美国阿拉巴马召开的第二届国际铸造金属基复合材料学术大会组织委员会成员。现在,国际上已出现仿生复合材料科学的强劲发展趋势,最明显的迹象是仿生材料杂志《Biomimetics》已于1992年创刊。日本工业技术院对21世纪初期产业的支柱报告中,在新材料领域中共列出14项基础研究课题,其中仿生材料,生物材料各占一项^[13]。显然,这都是我们应予充分注意的动向。

参考文献

- [1] Editorial Board, Comment on "Bionic design", *J. Japan Soc. Comp. Mater.*, 13 (1987) 251.
- [2] Zhou B. L., Shi C. X., Some new trends in the study of advanced composite materials, 1st Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing, 1992, Hangzhou, China.
- [3] 国家自然科学基金委员会, 国家自然科学基金重大项目简介, 科学出版社, 1991。
- [4] 曾其蕴, 李世红, 周本濂, 复合材料学报, 10卷, 1期 (1993) 1-8.
- [5] Zhou B. L., Introductory Workshop on Composite Materials, Trieste Italy, 28 Oct. - 8, Nov., 1991.
- [6] 曾其蕴, 李世红, 鲍贤熔, 林业科学, 28卷, 3期 (1992) 247-252.
- [7] Fu S. Y., Zhou B. L. and Lung C. W., *Smart Mater. Struct.*, 1 (1992) 180-185
Fu S. Y., Liu W. M., Zhou B. L. and Lung C. W., *J. Mater. Sci. and Technol.*, Vol. 9, No. 6 (1993) 400-404.
孙守金, 魏永良, 刘敏, 李敏君, 金属学报, 29卷, 4期 (1993) 158.
郑宗光, 浦桂玲, 李世红, 巴力学, 周本濂, 程国生, 材料科学进展, 7卷, 2期 (1993) 167.
Guo Y., Zhou B. L., Liu P. et al., *Chin. J. Met. Sci. Technol.*, Vol. 7 (1991) 353-358.
Zhou B. L., *Materials Engineering*, Vol. 3 (1992) 127.
Zhou B. L. International Symposium on Fine Ceramics, ARITA92' (1992).
日本工业技术院, 21世纪を拓く 基础技术, 1987。

A NEW RESEARCH TREND OF MATERIALS SCIENCE: BIOMIMETIC EXPLORATION OF COMPOSITE MATERIALS

Zhang Futian Feng Hanbao

(Department of Materials and Engineering, NSFC, Beijing 100083)

Abstract

This paper introduces the definition, methods and contents of biomimetic designs of composite materials and the related researches. The biomimetic designs and researches of composite materials supported by NSFC have achieved great success and attracted the attention of many scientists abroad in the materials science field.