

154288

# 生物复合材料的特征及仿生的探讨

曾其蕴

李世红 周本濂

(中国科学院应用生态所, 沈阳 110015) (中国科学院金属研究所)

**摘要** 竹、木材、骨和贝壳等生物材料都是复合材料，在长期自然进化中具有优良的结构和特性，问题是人们如何在复合材料的设计和加工中吸取这些特性。本文概述了复合材料仿生的基本情况，研究了生物材料复合结构的优良特征、功能适应性原理以及树木和骨骼的创伤愈合，并对复合材料的结构仿生和自愈合作了初步的探讨。

**关键词** 生物材料，仿生学，功能适应性，创伤愈合

人类的许多创造发明都是先从模仿自然开始的，仿生的作法自古有之，实例众多，仿生学的崛起并非偶然，但作为一个学科的正式诞生，是在1960年9月13日美国召开的第一次仿生学讨论会上斯蒂尔提出的。其定义是：仿生学是模仿生物系统的原理来建造技术系统，或者使人造技术系统具有或类似于生物系统特征的科学。仿生学用一句话来说，就是模仿生物的科学。

仿生学是运用生物系统方法来解决工程问题的技术，是系统设计的一种新方法，其理论基础是控制论<sup>[1]</sup>，从控制论的观点看，生物系统和自动机可以用同一个统一的理论来概括，它认为生物体和各种机械（控制、通讯、计算等）之间有着共同的原理。

专家们预言，材料智能化是21世纪的课题，这种智能材料象生物那样，根据外部条件变化而提供异常情况并相应地改变特性，且具有自行愈合、修复和再生的机能。从未来材料开发的观点出发，主要的要搞清生物反应的巧妙结构，使之反馈到以材料开发为主的有关问题上，一方面是把生物体作为反应场和物质生产场使用，在生物工程方面积极研究；另一方面是在了解生物反应结构的基础上，作结构仿生和功能模仿，人们称之为仿生，它正向前发展，蕴藏着美好的前景，人们对此十分关注。

尽管仿生学出现时间不长，发展有着诱人的前景，但难点很多。仿生学研究越深入，问题越多，普遍遇到的难题是，生物复杂纷繁，对其结构功能的机理了解很不深入，其优点何在？应对生物体机能了解到何种程度？分析生物系统所得到的概念如何能够用到制造的信息加工系统上去？二者联系的逻辑基础是什么？这些都不是轻而易举能解决的。本文仅就复合

材料仿生方面所遇到的一些问题提出初步探讨。

## 1 生物复合材料的结构特征

赫尔<sup>[2]</sup>将复合材料分为天然复合材料如木材、骨骼、肌肉和其它组织；微观复合材料如合金、增强增韧塑料等；和宏观复合材料如各种工程制品。并指出，大多数自然界存在的材料是从两种或更多的组分的组合中得到优异性能的。

### 1.1 纤维的形态与结构

纤维是生物体的主要组成部分，典型的纤维具有渐尖的末端，长度和宽度比显得很大，通常是厚壁的，只有很小的胞腔，是高分子链定向排列形式组成的材料。

纤维在木材（基体）中占其它组织的比例（体积分数）及纤维形态在不同的植物中有差异（表1），现已知植物中纤维最长的是苎麻，可达55cm。

表1 木纤维形态值

材 种	长 度 (mm)	宽 度 (μm)	壁 厚 (μm)	长 宽 比 (倍)	体 积 分 数 (%)
针 叶 材	2—5 (1—11)	50—60 (15—100)	4—3 (2—8)	100 (25—150)	>95
阔 叶 材	0.5—2	10—50	1—11	50—150	26—78

木纤维表面具有纹孔（壁孔），内表面大多是平滑的，有的分隔纤维有很薄的横壁，有些管胞（针叶材纤维）在次生壁内面有螺旋状隆起或称螺纹加厚。

动物的胶原纤维在纵切面上具有明显的横纹，明带和暗带按一定间距规则地排列。

纤维表面的纹孔、横隔和螺纹等对纤维是否有加强作用尚不清楚，但这些表面特征也许对纤维间的连接或和基体的其它组织的结合可能有好处。

纤维细胞壁的结构和形成是很复杂的，是一个典型的复合结构，其构成物质可分为：主要是短链高分子半纤维素的缔结物质、纤维素集束成微纤丝的骨架物质和主要是块状高分子木素的硬固物质所形成。可以认为是相当于钢筋的微纤丝、相当于石料的木素和相当于水泥的半纤维素所组成的类似于钢筋混凝土构造的材料<sup>[3]</sup>。

木材细胞壁中的纤维分子聚合成束状，称微纤丝，在微纤丝之间填充着半纤维素和木素。细胞壁可分初生壁、次生壁和细胞间质三层。初生壁的微纤丝排列方向无一定规则，松散成不规则的网状；次生壁层较厚，占整个细胞的90%以上，次生壁分外、中、内三层，外层占细胞壁厚的19~22%，微纤丝排列与细胞主轴近于垂直，为两层微纤丝交叉状排列；中层占细胞壁的70~90%，微纤丝方向与细胞主轴近于平行；内层占壁厚的2~8%，微纤丝方向与主轴近于垂直。木材纤维微观结构如图1。

人造纤维目前看来难以做到如此奇妙，同时也表明改进纤维结构和性能是大有潜力的。

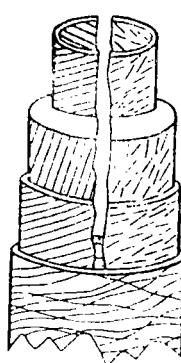


图1 木材纤维微观结构  
(引自Jane<sup>[4]</sup>)

有机体的纤维组织除某些有输导细胞的机能外，主要是充当机械组织的作用。纤维是略具弯曲的高分子以定向排列组成的材料，在受力时这些分子可以拉直，但拉伸量很小，一般不易延伸，通常被拉伸20%或更小就破坏，其分子在随机状态时不能卷拢，它有晶区和无定型区，纤维的弹性模量约为 $10\text{N/mm}^2$ ，骨胶原的弹性模量最高，可达 $100\text{N/mm}^2$ 以上，这是仿生中值得参考的。

对复合材料来说，除纤维本身的结构及其强度以外，纤维在基体中的分布排列以及和其他组织的结合也是重要因素。

## 1.2 纤维在基体中的排列

纤维在生物体中的排列是多种多样的，列举一些主要类型为复合材料仿生设计参考。草本单子叶植物维管束（纤维是主要的，也包括其它组织）的排列有：维管束排列成两圈的；同心排列成一圈的；维管束集中于茎中央的和最常见的一种是由很多大小不同的维管束分散于基本组织内（如竹、玉米等）。

动物的纤毛中的中央纤维和亚纤维是“9+2”的排列，具有蠕动性的低等动物的鞭毛也具有类似排列。

纤维排列的走向大多与主轴方向一致如木材、竹材。但叶子、节子、果实中纤维走向就多种多样，叶脉中维管束的分布和排列，对各种管网的设计有参考价值。

动物纤维的走向也各不相同，骨纤维组成的致密纤维束呈规则的分层排列，每层的纤维和基质形成板状结构，称骨板，骨板的纤维通常是纵向与横向交替排列，也有些骨板纤维成螺旋状排列，使骨板有较高的强度和韧性。

纤维是细长空心管子，对于给定的强度和刚度要求，它所需的材料比实杆少。植物细胞壁的实质密度约为 $1.5\text{g/cm}^3$ ，而组成木材时，最轻的轻木密度为 $0.1\sim0.2\text{g/cm}^3$ ，最重的铁梨木密度却为 $1.2\text{g/cm}^3$ 。现代建筑的最大高度是直径的 $20\sim30$ 倍，而许多植物可达 $50\sim100$ 倍，小麦可达 $200\sim300$ 倍。一根细长的麦杆，能支持比之重几倍的麦穗，其奥妙在于它是空心的管子，它受到外力发生变形时，一边受压力，另一边受拉伸，材料中心线附近长度基本不变，也就是说，离中心线越远，材料受力越大，空心管子的材料几乎都集中在离中心线很远的边缘上，因此，比一根同样重的实心杆的刚度大得多。

## 2 生物复合材料的功能适应性

不论是从形态学还是从力学的观点来看，生物材料都是很复杂的，这种复杂性是长期自然选择的结果，是功能适应性所决定的。

早在1895年Boux<sup>[5]</sup>阐明了功能适应性原理，认为一个器官对其功能的适应性是由实践

进化而来的，并提出自然进化的趋向是用最小的结构材料来承受最大的外力。他曾提出过松质骨最优的结构应是桁架形式。Pauwels (1948) 证实了上述说法，Kummer (1966) 也提出了人体股骨的三维桁架模型。

现存生物是20亿年来自然选择的结果，一定生态环境中生存的生物，具有最适应环境的结构，即其构造符合某种最佳设计。同样，生物体内各系统的构造也具有一定条件下获得所需功能的最佳状态。这便是仿生的理论依据，也以此来理解上述生物复合材料形态结构的多样性。

骨也适应功能性理论，马和中<sup>[6]</sup>指出，凡是骨中应力大的区域也正好配上强度高的区域。为什么外形不规则，内部组织分布又很不均匀的骨结构却是一个理想的等强最优结构？为什么骨能以较大密度和较高强度的材料配置在高应力区？目前被接受的一个解释是骨的功能适应性理论。可把骨看成具有反馈装置的控制系统，在外力作用下，骨以合适的截面承受外力，如外力增加，截面上与之平衡的应力也相应增加，增加后的应力刺激了骨，使它内部组织发生两方面变化，一是截面积增大，一是截面上单位面积抗载能力增强，这就保证能在新形势下抵抗外力。反之，如果外力下降，在骨的截面上则出现相反的变化。

我们在复合材料仿生设计中，以试验观察为依据。曾论述了竹材结构符合于功能适应性原理<sup>[7]</sup>。事实上竹材的整体结构也是很合理的，它是一个由基部向上逐渐递减的圆锥形的空心结构，每隔几厘米至几十厘米有一竹节，由节的横隔壁组成一个纵横关连的整体，这对中空细长的竹杆的刚度和稳定性起着重要的作用。试验结果表明（表2），带节的竹杆比不带节的竹筒，其抗劈开强度和横纹抗拉强度分别提高128.3%和49.1%。节子处由于维管束方向不与纵轴平行，抗拉强度有所下降，但此处组织膨大，使抗拉载面加大而保证了在外力作用下不在节子处破坏。

表2 刚竹竹杆强度

项 目	不 带 竹 节		带 竹 节	
	均 值	比 率	均 值	比 率
抗劈开强度(MPa)	0.60	100	1.39	228.3
横纹抗拉强度(MPa)	2.93	100	4.37	49.1

我们对毛竹的结构、纤维体积分数、密度及力学性质进行了定性和定量分析，表明竹杆的纤维体积分数沿径向（厚度方向）是由外（表皮）向内（髓环）逐渐减少（图2），其纤维排布规律可用下式表示

$$D = 1.70 \times 10^{-5} V_f^3 - 4.16 \times 10^{-3} V_f^2 + 0.37 V_f - 3.94$$

式中，D为距竹杆外表面的距离，mm；V<sub>f</sub>为竹杆中纤维的体积分数，%。

竹材密度和顺纹抗拉强度沿径向的变化规律与纤维体积分数的变化规律也几乎是一致的，只是在髓环处由于有大量的厚壁硅质细胞而密度有所增加（图3）。

我们以竹节间的竹简作为仿效对象，模仿其中纤维体积分数分布规律，将其拓扑变换为一个梁——仿竹梁，用碳纤维/环氧树脂复合材料进行了实验验证，表明仿竹梁的抗弯强度比

纤维均匀梁平均提高约80%（表3）。

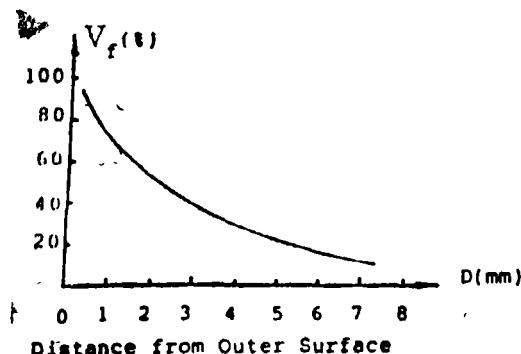


图2 竹纤维体积分数沿径向分布

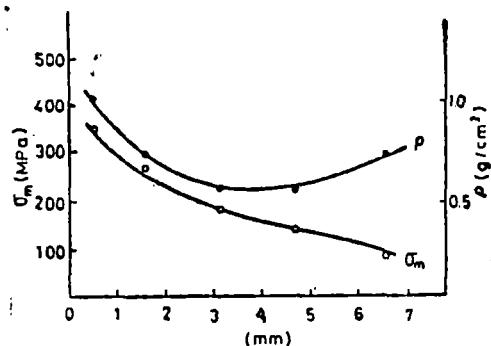


图3 竹材密度和抗拉强度沿径向分布

表3 碳纤维/环氧树脂复合材料实验验证

	抗弯强度(MPa)						
	仿生梁	214.3	359.8	258.7	240.6	217.1	345.4
均匀梁	133.2	188.5			130.8		
增加(%)	60.9	90.9			102.9		
平均增加(%)				80.7			

### 3 生物复合材料的创伤愈合

生活的有机体的显著特点之一是具有再生的机能，受到损伤破坏以后能自行调整创伤愈合，这里举树木和骨的愈合过程。

伊稍<sup>[8]</sup>曾指出，树木除去一层树皮，在暴露的表面可以发育出愈伤组织，并部分的填充了空隙，在这愈伤组织中，开始发育出形成层，愈伤组织形成层的分化，从受伤的所有边缘向着中心逐渐延伸，新的维管束形成层产生出木质部和韧皮部，与茎中未受伤部分的组织相连接。

愈伤组织可能由形成层的细胞产生，也可能由维管区域的其它没有次生壁的生活细胞变成。实验发现，韧皮部射线薄壁组织和木质部射线未成熟部分的薄壁组织，在产生愈伤组织中显得特别活跃。从嫁接成活实例中看到，在砧木和接穗的切面上，靠近切口的完整细胞逐渐变大，其体积比其它同类细胞大得多，这被称为细胞肥肿现象，其大小的增加可在几个细胞的深处发生，接着这种膨大的细胞分裂，产生出许多细胞，使砧木和接穗的愈伤组织互相混合，在混合的愈伤组织中，在砧木和接穗的形成层同一条线上形成了维管束形成层，由于形成层活动的结果，使嫁接的二个组织部分的木质部和韧皮部连接。

骨也有自然愈合的功能，其愈合过程有四个阶段<sup>[6]</sup>：(1) 骨折发生后，断裂处周围血管破裂，形成以裂口为中心的血肿，在6—8天内血肿形成血凝块，使断裂处初步衔接；(2)

血凝块形成后，周围的毛血管不断增生，且纤维母细胞和巨噬细胞等入侵以取代凝血块，形成纤维组织组成的骨痂；（3）骨折后，断口附近的骨内膜和骨外膜开始增生和加厚，成骨细胞大量生长制造出新的骨组织，与此同时，断口内的纤维性骨痂逐渐变成软骨，进一步增生、钙化而形成骨质，经一定时间后，中间骨痂和内外骨痂合并形成，在成骨细胞和破骨细胞的共同作用下，使原始骨痂逐渐的改造成正常骨。

我们根据生物体损伤愈合的机理，对金属基复合材料内部纤维开裂和折断损失的愈合进行了探索<sup>[9]</sup>。我们可以把复合材料中的增强纤维设计制造成为管状纤维，在管内装入愈合剂，当纤维受到损伤开裂，愈合剂流出，使受损材料愈合。根据这种思想，把内径约为1mm的紫铜管吸入熔点较低的合金，模拟管状增强纤维，然后在管上制造缺陷，装入钻有孔的工业纯铝块内，最后封口，这样就准备好了存在有内部损伤的模拟试样。愈合过程是通过加热至一定温度，使管内的愈合剂（类似于生物体内的分泌物）流出，使在裂口和分离表面上湿润，并充满裂口和分离处的间隙，使断裂面相互连接，而达到愈合的目的。

## 4 结语

生物有机体是一种天然复合材料，其结构和功能合理，使生物材料具有很高的比强度和比模量。不论是从形态学，还是从力学的观点看，生物的结构和功能都是非常复杂的。这种复杂性是长期自然进化的结果，是功能适应性所决定的。生物体普遍存在以较大的密度和较高强度的材料来配置在高应力区，并以最少的结构材料来承受最大的外力，而且能根据外界条件的变化，部份地调整和改变组织结构，具有再生的机能，这是目前人工工程材料难以做到的。总结生物体的有用规律、建立模型、为复合材料的研究和设计提供依据是一种有效的方法。我们在复合材料的结构仿生和愈合仿生方面作了一些初步探索，但更高层次的仿生有待进一步研究。

## 参 考 文 献

- 1 尹渡洞二。从仿生学到认识科学。国外科技动态。1985, 10: 16~21
- 2 赫尔 D著。张双寅译。复合材料导论。中国建筑工业出版社。1989, 2
- 3 渡边治人著，张勤颤等译。木材应用基础。上海科学技术出版社。1986, 28
- 4 冯元桢。生物力学。科学出版社。1983, 175
- 5 郑湘如等。植物解剖结构显微图谱。科学出版社。1983, 35
- 6 伊稍 K著，李正理等译。植物解剖学。科学出版社。1962, 68
- 7 马和中。生物力学导论。北京航空学院出版社。1986, 133

## THE CHARACTERISTICS OF BIOMATERIALS AND BIOMIMETICS OF COMPOSITE MATERIALS

Zeng Qiyun

(Institute of Applied Ecology, Academia Sinica)

Li Shihong Zhou Benlian

(Institute of Metal Research, Academia Sinica)

**Abstract** Almost all natural biomaterials are composite materials, such as bamboo, wood, bone and shell, etc.. They have formed distinguished structures after millions of years of natural selection and evolution. In the present paper, the origination, development and some applications of bionics were reviewed and some optimal characteristics and superiorities of the composite structures of natural materials were studied. The result reveals that both plant and animal materials conform to the "Principle of Functional Adaptability". Finally, the self-healing abilities of trauma of bone and wood were studied, which provides the necessary preparation for the research of the self-healing of composite materials.

**Key words** biomaterial, bionics, functional adaptability, self-healing of trauma

### 作为主受力构件的CFRP——最弱层设计思想的基础

1. 碳纤维的高强度和高延伸率化
2. 碳纤维高性能化与CFRP高性能化的关系
3. 碳纤维的表面处理  
(以上刊于1992年第九卷第4期)
4. 高韧性基体树脂

CFRP的基体，从开发之初起就一直采用环氧树脂，但由于吸湿和高温下的压缩性能及受冲击损伤后的压缩性能作为设计容许值而受到了重视，所以除了环氧树脂的改性之外，研究方向转向耐热性优良的聚酰亚胺树脂及韧性高的热塑性树脂。先介绍环氧树脂的高韧性化