

# 生物质点阵结构材料的 力学性能分析

胡英成 等 著



科学出版社

# 生物质点阵结构材料的 力学性能分析

胡英成 等 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书介绍了东北林业大学胡英成教授的科研团队在生物质点阵结构材料方面的部分研究成果。全书主要涉及两种生物质点阵结构。一种是木质基点阵夹芯结构,该种结构是对传统木质集成材、工字梁等结构的优化,研究内容涉及直柱型、倾斜型和X型3种芯子构型夹芯结构的平压性能、剪切性能、弯曲性能与侧压性能等力学性能。另一种是菠萝叶纤维点阵圆筒结构,该种结构是对传统实心木柱的优化,研究内容涉及胞元构型与圆筒层数对菠萝叶纤维点阵圆筒结构平压性能的影响。

本书可供木材科学与工程、木结构材料与工程、复合材料等领域的工程技术人员使用,也可供高等院校相关专业师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

生物质点阵结构材料的力学性能分析/胡英成等著. —北京:科学出版社, 2018.12

ISBN 978-7-03-060057-8

I. ①生… II. ①胡… III. ①生物材料—材料力学性质—性能分析  
IV. ①R318.08

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第276219号

责任编辑:王海光 王 好 陈 倩 / 责任校对:郑金红

责任印制:吴兆东 / 封面设计:刘新新

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018年12月第一版 开本:720×1000 1/16

2018年12月第一次印刷 印张:11

字数:250 000

定价:108.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

点阵结构是一种由协同优化设计(集材料设计、结构设计与功能设计为一身)产生的夹芯结构,具有轻质、高强、高韧的特点,已成为当前国际上新一代最有应用前景的多功能结构材料之一,在先进复合材料领域已取得长足的研究进展和广泛的应用。而在木质复合材料领域,点阵结构的研究才刚起步。传统的工程木质复合材料在宏观上多为实心结构,如胶合木、单板层积材、单板条定向层积材等,其结构与功能还有进一步优化的空间。借助点阵结构,对木质复合材料进行结构优化设计,使其满足轻质、高强的结构要求,对扩大木质复合材料的应用领域具有重要意义。

本书分为三部分,第一部分为第1章,概述了木质(生物质)工程材料及点阵结构的研究现状;第二部分为第2~5章,主要涉及木质基点阵夹芯结构的力学性能研究;第三部分为第6~9章,主要涉及菠萝叶纤维点阵圆筒结构的力学性能研究。本书以大量的试验过程、试验数据及理论分析为支撑,重点介绍了木质基点阵夹芯结构与菠萝叶纤维点阵圆筒结构的最新研究成果。通过这些研究,可为生物质点阵结构材料的力学性能理论分析和试验方法研究提供一些借鉴。

本书由东北林业大学胡英成教授科研团队撰写,参加撰写人员有胡英成教授、张利博士(现为西北农林科技大学讲师)、金明敏硕士、郝美荣硕士、邹铁笑硕士,以及博士生赵鑫、叶高远。

本书内容为国家自然科学基金(31470581)、中央高校基本科研业务费专项资金(2572016EBJ1)的阶段性研究成果。本书所选取的生物质点阵结构阵型及制备材料、性能分析方法都很有限,对于其他的制备材料与结构阵型,还需要进一步深入研究,这也是本书撰写团队后续的工作。

鉴于作者水平有限,书中不足之处在所难免,敬请同行和广大读者批评指正。

著 者

2018年9月



# 目 录

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 1 绪论                       | 1  |
| 1.1 新型生物质工程材料              | 3  |
| 1.2 点阵夹芯结构                 | 4  |
| 1.3 点阵圆筒结构                 | 5  |
| 1.4 木质夹芯结构                 | 7  |
| 1.5 本书主要研究内容               | 9  |
| 2 木质基点阵夹芯结构的制备             | 10 |
| 2.1 试验材料                   | 10 |
| 2.2 点阵夹芯结构的构型设计            | 11 |
| 2.2.1 直柱型点阵夹芯结构            | 11 |
| 2.2.2 倾斜型点阵夹芯结构            | 12 |
| 2.2.3 X型点阵夹芯结构             | 12 |
| 2.3 单板层积材和木质基点阵夹芯结构的制备工艺   | 13 |
| 2.3.1 杨木单板层积材的制备           | 13 |
| 2.3.2 简单的插入-胶合方法制备点阵夹芯结构   | 13 |
| 2.3.3 X型点阵夹芯结构三点弯曲(短梁剪切)试件 | 14 |
| 2.3.4 X型点阵夹芯结构四点弯曲试件       | 16 |
| 2.3.5 增强的插入-胶合方法制备点阵夹芯结构   | 17 |
| 2.4 小结                     | 17 |
| 3 木质基点阵夹芯结构性能的理论分析及检测方法    | 18 |
| 3.1 木质基点阵夹芯结构力学性能的理论分析     | 18 |
| 3.1.1 平压性能理论分析             | 18 |
| 3.1.2 剪切性能理论分析             | 22 |
| 3.1.3 三点弯曲(短梁剪切)性能理论分析     | 24 |
| 3.1.4 四点弯曲性能理论分析           | 28 |
| 3.1.5 侧压性能理论分析             | 28 |

|       |                         |    |
|-------|-------------------------|----|
| 3.2   | 试验材料力学性能的检测方法           | 29 |
| 3.2.1 | 桦木圆棒桦力学性能检测方法           | 29 |
| 3.2.2 | 胶黏剂胶接强度检测方法             | 29 |
| 3.2.3 | 木质复合材料力学性能检测方法          | 29 |
| 3.3   | 点阵夹芯结构力学性能的检测方法         | 32 |
| 3.3.1 | 平压性能检测方法                | 32 |
| 3.3.2 | 剪切性能检测方法                | 32 |
| 3.3.3 | 三点弯曲（短梁剪切）性能检测方法        | 33 |
| 3.3.4 | 四点弯曲性能检测方法              | 35 |
| 3.3.5 | 侧压性能检测方法                | 36 |
| 3.4   | 小结                      | 37 |
| 4     | 木质原材料的力学性能分析            | 38 |
| 4.1   | 桦木圆棒桦的力学性能分析            | 38 |
| 4.2   | 定向刨花板的力学性能分析            | 40 |
| 4.3   | 单板层积材的力学性能分析            | 42 |
| 4.3.1 | LVL <sub>1</sub> 力学性能分析 | 42 |
| 4.3.2 | LVL <sub>2</sub> 力学性能分析 | 44 |
| 4.4   | 桦木锯材的力学性能分析             | 47 |
| 4.4.1 | 桦木锯材标准弯曲试件              | 47 |
| 4.4.2 | 桦木锯材点阵夹芯结构弯曲试件面板        | 50 |
| 4.5   | 钻孔对木质材料力学性能的影响          | 51 |
| 4.6   | 点阵夹芯结构弯曲试件面板的优选         | 57 |
| 4.7   | 小结                      | 58 |
| 5     | 木质基点阵夹芯结构的力学性能分析        | 60 |
| 5.1   | 直柱型木质基点阵夹芯结构的力学性能分析     | 60 |
| 5.1.1 | 平压性能分析                  | 60 |
| 5.1.2 | 剪切性能分析                  | 64 |
| 5.1.3 | 弯曲性能分析                  | 65 |
| 5.1.4 | 侧压性能分析                  | 67 |
| 5.2   | 倾斜型木质基点阵夹芯结构的力学性能分析     | 69 |
| 5.2.1 | 平压性能分析                  | 69 |
| 5.2.2 | 剪切性能分析                  | 73 |

|       |                       |     |
|-------|-----------------------|-----|
| 5.2.3 | 弯曲性能分析                | 73  |
| 5.2.4 | 侧压性能分析                | 76  |
| 5.3   | X型木质基点阵夹芯结构的力学性能分析    | 78  |
| 5.3.1 | 平压性能分析                | 78  |
| 5.3.2 | 剪切性能分析                | 84  |
| 5.3.3 | 弯曲性能分析                | 92  |
| 5.4   | 试验实测值与理论预测值的对比分析      | 99  |
| 5.4.1 | 平压性能对比分析              | 99  |
| 5.4.2 | 剪切性能对比分析              | 104 |
| 5.4.3 | 弯曲性能对比分析              | 106 |
| 5.4.4 | 侧压性能对比分析              | 112 |
| 5.5   | 小结                    | 113 |
| 6     | 菠萝叶纤维点阵圆筒结构的制备及材料性能分析 | 115 |
| 6.1   | 菠萝叶纤维点阵圆筒结构的制备工艺      | 115 |
| 6.1.1 | 点阵圆筒结构的设计             | 115 |
| 6.1.2 | 木模的制备                 | 115 |
| 6.1.3 | 硅橡胶模的制备               | 117 |
| 6.1.4 | 点阵圆筒结构的制备工艺           | 118 |
| 6.2   | 菠萝叶纤维增强复合材料的性能分析      | 119 |
| 6.2.1 | 菠萝叶纤维增强复合材料的制备        | 119 |
| 6.2.2 | 菠萝叶纤维增强复合材料的拉伸性能      | 120 |
| 6.2.3 | 菠萝叶纤维肋条的压缩性能          | 122 |
| 6.3   | 小结                    | 123 |
| 7     | 菠萝叶纤维点阵圆筒结构的平压性能      | 124 |
| 7.1   | 菠萝叶纤维点阵圆筒结构的原材料与平压试验  | 124 |
| 7.1.1 | 试验材料                  | 124 |
| 7.1.2 | 试验方法                  | 124 |
| 7.1.3 | 结果与讨论                 | 127 |
| 7.2   | 菠萝叶纤维点阵圆筒结构的参数研究      | 132 |
| 7.2.1 | 试验方法                  | 132 |
| 7.2.2 | 结果与讨论                 | 133 |
| 7.3   | 小结                    | 135 |

8 构型与层数对菠萝叶纤维点阵圆筒结构平压性能的影响 ..... 137

8.1 胞元构型对菠萝叶纤维点阵圆筒结构平压性能的影响 ..... 137

8.1.1 不同构型点阵圆筒的制备 ..... 137

8.1.2 试验方法 ..... 138

8.1.3 结果与讨论 ..... 139

8.2 圆筒层数对菠萝叶纤维点阵圆筒结构平压性能的影响 ..... 144

8.2.1 不同层数点阵圆筒的制备 ..... 144

8.2.2 试验方法 ..... 145

8.2.3 结果与讨论 ..... 146

8.3 小结 ..... 151

9 菠萝叶纤维/玻璃纤维夹芯点阵圆筒结构的平压性能分析 ..... 152

9.1 菠萝叶纤维/玻璃纤维夹芯点阵圆筒结构的制备 ..... 152

9.1.1 菠萝叶纤维/玻璃纤维夹芯点阵圆筒结构的设计 ..... 152

9.1.2 设计理念 ..... 153

9.1.3 制备工艺 ..... 154

9.2 菠萝叶纤维/玻璃纤维夹芯点阵圆筒结构的平压测试 ..... 155

9.2.1 性能测试 ..... 155

9.2.2 结果与讨论 ..... 155

9.3 小结 ..... 159

参考文献 ..... 161



# 1 绪 论

四大建筑材料包括钢铁、水泥、木材、塑料,其中木材是唯一的可再生资源,相比其他材料,木材具有较高的比强度和突出的隔热保温、吸音隔声及自然美观、质感舒爽等环境协调性能,这些特点使得木材及木制品在木结构建筑中得到了越来越广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。19世纪以前,人们将木结构作为一种主要的建筑方式,忻州南禅寺、五台山佛光寺、蓟州独乐寺、佛宫寺释迦塔(俗称应县木塔)等都是历史比较久远的木结构建筑。之后随着新材料的出现,钢结构、混凝土结构的建筑占据了主导。近年来,木结构建筑由于无污染、符合可持续发展的理念,又重新进入了人们的视线。

与世界各国相比,我国的森林资源存在一些不足,主要包括:资源少、覆盖率低;资源分布不均衡;用材林多、防护林少;森林质量不高<sup>[3]</sup>。国内木材需求量逐渐增大,但可供使用的木材量有限,一些较好的实木材料生长周期比较长,供不应求,同时出于保护生态环境的要求,国家限制对天然林木材的砍伐。谭秀凤分析预测 2010~2050 年,我国木材的需求增长速度为 13%,供给增长速度为 6%,供给增长速度远低于需求增长速度,到 2050 年,供需缺口将达到 6 亿  $\text{m}^3$ <sup>[4]</sup>。为缓解木材短缺的状况,我国开始从国外进口木材<sup>[5]</sup>,2010 年,我国从北美洲进口原木 397.15 万  $\text{m}^3$ <sup>[6]</sup>。在这种情况下,寻找探索一些具有高性能、高附加值、多功能的新型生物质工程材料显得尤为重要<sup>[3]</sup>。一些新材料的发现是从仿生角度开始的,点阵结构的提出也和仿生有关。

自然界中,木材、珊瑚、骨头等材料相对密度较低,且可以承受持续的载荷作用,这类材料的共同特点是材料内部有一定数量的孔洞,人们将这类材料称为多孔材料。多孔材料按照微结构可以分为无序材料与有序材料。无序材料主要为泡沫材料,包括开孔泡沫与闭孔泡沫;有序材料主要为点阵材料<sup>[7]</sup>。在过去的很多年间,金属泡沫材料由于有较高的强度,引起了学者的极大重视<sup>[8]</sup>,然而金属泡沫、聚合物泡沫材料的变形是由孔壁局部弯曲引起的<sup>[8,9]</sup>,且材料内的孔洞排列不规则,故其力学性能没有办法进行优化,因此人们开始关注点阵材料<sup>[10-17]</sup>。

点阵结构的概念提出后,由于该结构的设计理念可以实现集材料设计、结构设计和功能设计于一体<sup>[9,18,19]</sup>,受到了国内外学者的广泛关注,被认为是极具发展前景的一类新型材料<sup>[9,18-20]</sup>,主要应用于航空航天领域。点阵结构根据微结构的构造形式,可以分为二维点阵结构与三维点阵结构。二维点阵结构也被称为格

栅结构<sup>[7]</sup>，如图 1-1 所示；三维点阵结构主要是杆件或者板单元按照一定的顺序排列组合成的空间桁架结构<sup>[7]</sup>，如图 1-2 所示。

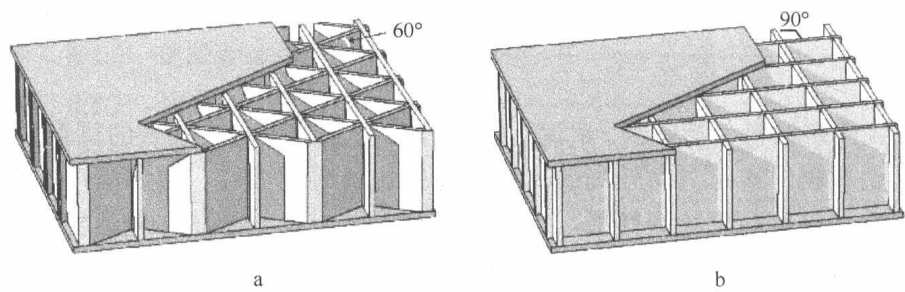


图 1-1 二维点阵结构全三角形 (a) 与四边形 (b)

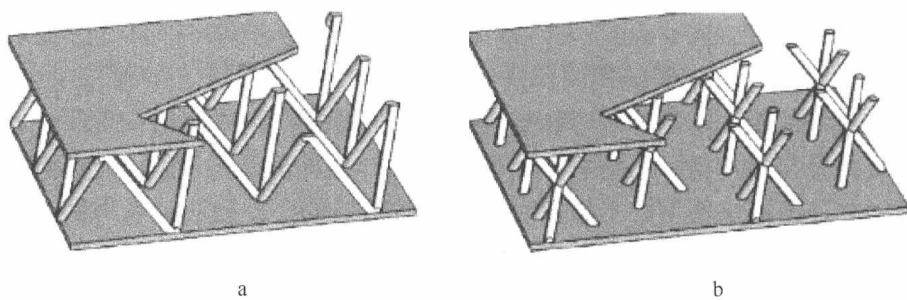


图 1-2 三维点阵结构四面体 (a) 与 Kagome 形 (b)

点阵结构根据母体材料的性质，可以分为金属点阵结构与复合材料点阵结构<sup>[7]</sup>。二维金属点阵结构的制备工艺主要为嵌锁工艺<sup>[21]</sup>与金属二维编织法<sup>[22]</sup>，三维金属点阵结构的制备工艺有熔模铸造法<sup>[23]</sup>、冲压折叠工艺<sup>[23]</sup>、金属丝编织工艺<sup>[24]</sup>、拉挤一体化工艺<sup>[25]</sup>。二维复合材料点阵结构的制备工艺有嵌锁工艺<sup>[26]</sup>、挤压成型工艺<sup>[27]</sup>、混杂模具法和缠绕工艺<sup>[28]</sup>，三维复合材料点阵结构的制备工艺有水切割工艺<sup>[17]</sup>、网架穿插编织工艺<sup>[29]</sup>和热压工艺<sup>[30]</sup>等。

复合材料点阵结构的研究包括材料选择、制备工艺、结构设计、结构优化、拓扑构型、性能表征、动静态分析、模型预测、评价指标及其工程应用等方面<sup>[20]</sup>。吴林志等<sup>[20]</sup>总结了工程材料的材料强度与密度的关系，认为复合材料点阵结构的研究填补了工程材料的一些空缺，在低密度区域的平压强度方面性能尤为突出，随着制备工艺的完善及一些新型生物质材料的加入，复合材料的平压性能可以得到进一步的完善。复合材料点阵结构相比于其他材料来说，剪切强度优势不太明显，主要由于关于点阵结构的研究集中在平压强度方面，对于剪切强度的研究相对较少，同时制备工艺的局限性使得剪切性能方面的研究成果不太理想，有待进一步探索。

## 1.1 新型生物质工程材料

在现代木结构建筑中，作为承重结构材使用的木制品主要是原木、方木、结构用集成材（也称胶合木，glulam）、大截面单板层积材（laminated veneer lumber, LVL）及单板条定向层积材（parallel strand lumber, PSL）等。但这些木质工程材料的截面多是矩形且为实心结构。

为了满足现代木结构建筑对圆形木柱的需求，出现了依据单板层积原理、模拟木材细胞壁 S2 层的构造、应用螺旋缠绕法制备的新型工程材料——空心圆筒单板层积材，其构造模型图如图 1-3 所示。山内秀文<sup>[31]</sup>采用柳杉与黑松单板作为试验原料，制备了圆筒 LVL，通过研究发现，该结构在长轴方向的力学性能较为优越。魏延霞<sup>[32]</sup>采用杨木与桦木旋切单板，添加玻璃纤维作为增强材料，制备了复合型圆筒 LVL，通过分析发现，该结构依然存在吸湿滞后特性，同时，玻璃纤维的加入可以提高圆筒 LVL 的抗弯强度及尺寸稳定性。

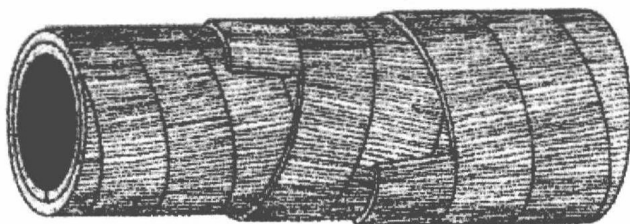


图 1-3 空心圆筒单板层积材的构造模型图

近年来，随着国家禁止采伐天然林举措的实施及人工林木材的开发利用，出现了不同截面形状的空心胶合木柱，一些典型的截面形状如图 1-4 所示。空心结构可以节省木材，减轻结构自重，可提高结构自身的刚度及抗震性，同时可在空心部位进行功能设计。罗志华<sup>[33]</sup>用落叶松制备了胶合空心木柱，并用碳纤维布对其进行加固。陈银慧等<sup>[34]</sup>探索了胶合空心木柱的制备工艺，并对其截面形状进行了设计。

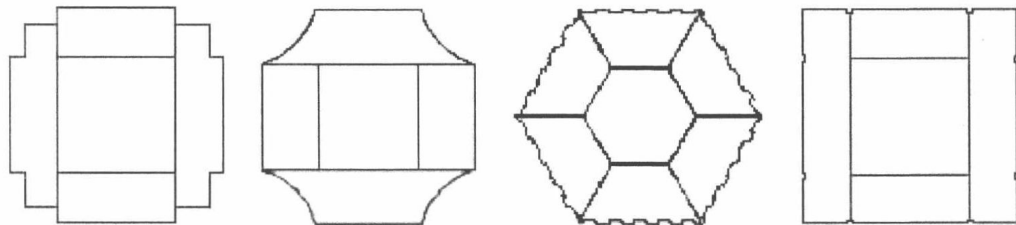


图 1-4 空心胶合木柱的截面形状图

点阵结构也是一种空心结构，现被广泛应用于复合材料领域，由于该结构具有轻质高强，空隙率大，容易埋藏小型器件或功能性材料的优势，也被应用到了木质工程材料领域<sup>[35, 36]</sup>。张利<sup>[37]</sup>采用木质材料设计制备了两种点阵结构，与集成材、工字梁（I-shape beam）进行分析对比，发现点阵结构的设计在比强度、比模量、阻尼性能、韧性方面优势更大，同时该结构自重小、成本低。Jin 等<sup>[38]</sup>采用插入-胶合法制备了木质基二维点阵夹芯结构，通过研究发现，木质基点阵夹芯结构有较好的能量吸收能力。Klimek 等<sup>[39]</sup>采用嵌锁工艺制备了 Kagome 木质基夹芯结构，如图 1-5 所示，芯子材料选用胶合板，面板材料为刨花板，通过分析结构的平压、侧压与弯曲性能，发现该结构在轻质方面具有一定的竞争性。

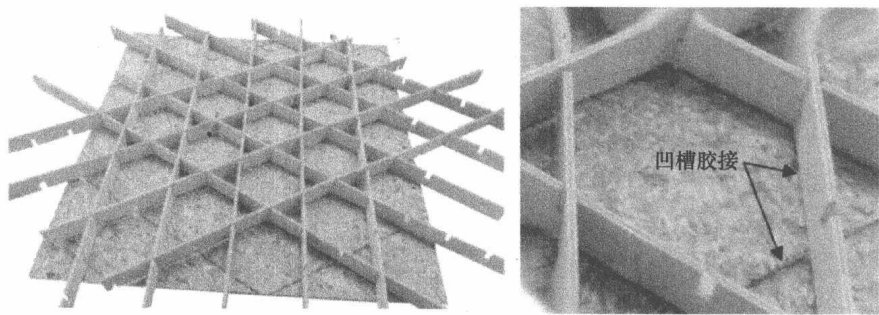


图 1-5 Kagome 木质基点阵夹芯结构

通过上述分析可知，为满足现代木结构建筑的需求，一些新型生物质工程材料，如圆形木柱、空心结构逐渐进入了人们的视线，但这方面的研究还较少，故生物质材料空心结构的研究具有一定的必要性。

## 1.2 点阵夹芯结构

近年来，普林斯顿大学的 Evans 等<sup>[40]</sup>、Chiras 等<sup>[41]</sup>、Wang 等<sup>[42]</sup>，剑桥大学的 Deshpande 等<sup>[43]</sup>，麻省理工学院的 Wallah 和 Gibson<sup>[44]</sup>，哈佛大学的 Wicks 和 Hutchinson<sup>[45]</sup>等提出了空间点阵夹芯结构的概念。与现有空间网架结构相类似，空间点阵夹芯结构是由连接结点及结点间的杆件单元组成的，但点阵夹芯结构的尺寸要小得多。点阵夹芯结构具有空隙率大且相互联通的特点，易于埋置功能性材料和小型器件等，因此可实现储能、热控等多功能一体化。由于优异的比强度和比刚度及较大的相互连通空间，点阵夹芯结构被视为最有前景的新一代材料。最初，点阵夹芯结构是依据高强度的铝合金（如钛<sup>[46]</sup>和铝<sup>[47]</sup>）来设计与制备的。Wicks 和 Hutchinson<sup>[48]</sup>基于指定的横向剪切与弯曲载荷来优化设计这种点阵夹芯结构。除此之外，这种点阵夹芯结构的动静态力学响应被国内外多名

学者所研究<sup>[49-55]</sup>。

由于使用碳纤维复合材料制备的点阵夹芯结构具有轻质高强的特点,因此吸引了大批国内外学者对其进行研究<sup>[56-64]</sup>。碳纤维点阵夹芯结构的主要制备工艺有两种,分别是预浸料热压法<sup>[56-60]</sup>和插入-胶合法<sup>[63, 64]</sup>。2011年, Li 等<sup>[65]</sup>研究了碳纤维复合材料金字塔点阵夹芯结构在端压时的结构响应,试验表明节点破坏是碳纤维金字塔点阵夹芯结构在端压时的主要失效模式。2012年, Xiong 等<sup>[66]</sup>研究了碳纤维金字塔点阵夹芯结构的三点弯曲和纯剪切性能。2013年, Manalo<sup>[67]</sup>研究了由玻璃纤维复合材料的面板和蜂窝状芯子材料制作成的纤维增强材料夹芯结构梁,在短梁弯曲(对称和非对称)模式下的剪切行为。2013年, Fan 等<sup>[68]</sup>研究了不同面板厚度的点阵夹芯结构的弯曲性能和压缩行为。2013年, Yan 等<sup>[69]</sup>研究了全金属波浪芯子夹芯结构的力学行为。2014年, Wang 等<sup>[70]</sup>采用热压一体成型工艺制备了二维碳纤维增强复合材料夹芯结构。试验表明:在剪切和弯曲试验中,当面板出现分层现象时节点并未出现破坏;与传统的夹芯结构相比,面板的分层是夹芯结构最初的破坏形式,先于面板与芯子的剥离。Yin 等<sup>[71]</sup>研究了一种新型的混合点阵夹芯结构,他们将二阶点阵芯子材料用于制备碳纤维复合材料金字塔点阵夹芯结构。

由于低密度碳纤维增强复合材料具有优异的力学性能,可被用于制备超轻点阵夹芯结构,从而得到越来越多的关注。目前,碳纤维点阵夹芯结构的制备工艺主要有两种,即预浸料热压法和插入-胶合法。这些点阵夹芯结构由特殊金属或者碳纤维增强材料制备而成,被用于高速交通工程和航空航天工程,但在木结构领域,还没有报道运用木质复合材料来制备木质基点阵夹芯结构。

### 1.3 点阵圆筒结构

格栅结构的概念<sup>[72]</sup>提出后,其较高的结构设计性与潜在的功能优越性,吸引了人们的关注。格栅结构的几何形式可设计,相比于同等重量的结构,具有较好的力学性能;相比于蜂窝夹芯结构,具有较好的抗腐蚀性能;相比于传统的结构形式,具有较好的抗冲击性,肋条的裂缝不易传播,故该结构被广泛地应用在航空航天领域。杜善义等<sup>[73]</sup>指出,为进一步实现结构的轻质高强,可以根据结构的受力情况来设计增强体的取向。点阵圆筒结构属于格栅结构,其增强体的取向为轴向,其设计理念为承压结构。

点阵圆筒结构根据 Deshpande 等<sup>[9]</sup>提出的拓扑规则,可以分为拉伸主导型结构和弯曲主导型结构,图 1-6 为一些常见的胞元构型。图 1-6 中,六边形胞元(图 1-6a)与四边形胞元(图 1-6b)为弯曲主导型结构,其余均为拉伸主导型结构。拉伸主导型结构的杆件在受力过程中主要产生轴向变形,弯曲变形忽略不计,

弯曲主导型结构的杆件在受力过程中主要产生弯曲变形。范华林等<sup>[74]</sup>通过比较弯曲主导型和拉伸主导型结构的模量与强度特征发现，在相同密度下，拉伸主导型结构的模量与强度远大于弯曲主导型结构，故拉伸主导型材料更加吸引人们的关注。

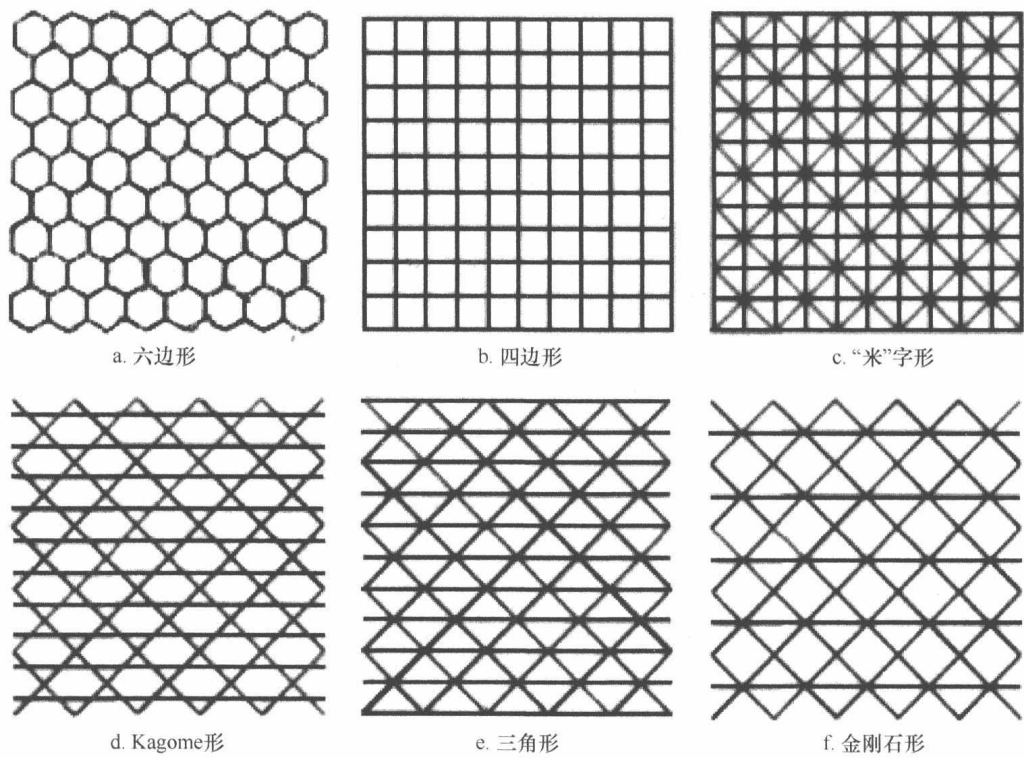


图 1-6 常见的胞元构型

制备点阵圆筒结构的关键是制备点阵肋条，缠绕法<sup>[16, 75, 76]</sup>是最常用的一种制备工艺。缠绕法分为两类：自由缠绕与凹槽缠绕。自由缠绕制备的点阵肋条横截面形状不固定，杆件的质量较差，制备的点阵结构含有自由缺陷；凹槽缠绕在模具辅助的作用下，点阵肋条的截面形状容易控制，故该种制备方法被广泛应用于航空航天领域。常见的模具材料包括金属<sup>[16]</sup>、硬质聚氨酯泡沫塑料、石膏和硅胶等<sup>[77]</sup>。Chen 等<sup>[75]</sup>采用金属模具设计制备了 Kagome 点阵夹芯圆筒结构，为方便脱模，通常分为多个模具块。Buragohain 和 Velmurugan<sup>[77]</sup>采用硬质聚氨酯泡沫塑料作为模具材料制备点阵圆筒结构，如图 1-7 所示。张昌天<sup>[78]</sup>采用硅橡胶作为模具材料，如图 1-8 所示。

点阵圆筒结构的力学性能研究集中在平压试验、理论分析与有限元分析方面。Kim<sup>[16]</sup>制备了碳纤维等网格加筋点阵圆筒，通过轴向力学测试，发现该结构的主



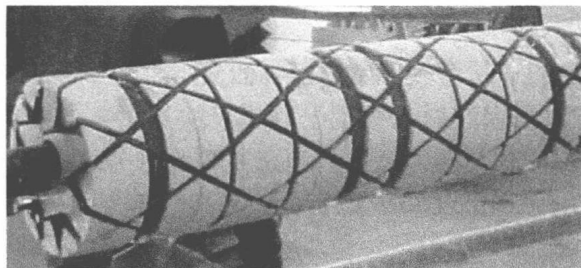


图 1-7 硬质聚氨酯泡沫塑料模具（彩图请扫封底二维码）

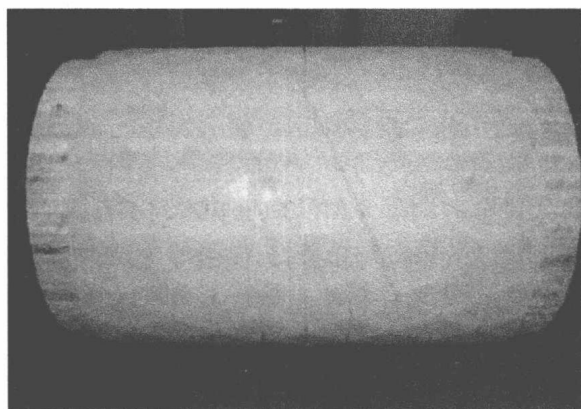


图 1-8 硅橡胶模具（彩图请扫封底二维码）

要失效形式为肋条的屈曲。Fan 等<sup>[76]</sup>制备了碳纤维点阵夹芯圆筒，轴向压缩测试发现点阵夹芯圆筒的刚度与强度优于加筋点阵圆筒。Sun 等<sup>[79]</sup>针对碳纤维复合材料点阵夹芯结构的失效模式——整体屈曲、面层胞元屈曲、面层局部屈曲、点阵肋条压折和强度失效，分别给出了理论预测公式。Lopatin 等<sup>[80]</sup>通过分析给出了点阵圆筒结构的轴向位移计算公式，同时推导计算了壳体的轴向刚度。张昌天<sup>[78]</sup>通过有限元分析，探索了点阵圆筒参数对比载荷与刚度的影响。

点阵圆筒结构是一种空心结构，在复合材料领域主要使用碳纤维与玻璃纤维制备<sup>[81-83]</sup>，在生物质材料方面的研究相对较少，故本书将会采用生物质材料制备点阵圆筒结构，对其性能进行分析探索。

## 1.4 木质夹芯结构

2004 年，许小君等<sup>[84]</sup>设计了一种以纸、钙塑板、三合板和废旧瓦楞板为面板，以添加了不同剂量发泡材料的聚氨酯材料作为芯材，以铜丝、纸、纱布和瓦楞板为夹层，利用聚氨酯发泡材料自身的黏合力构成的功能性夹芯复合材料，这种材料可作为具有防潮、隔热、隔音等功能的功能性材料使用。2007 年，徐朝阳<sup>[85]</sup>

使用不同的木质材料作面板与纸质蜂窝复合材料制备绿色包装材料,并研究了这种夹芯材料的流变特性、抗弯性能及共面异面变形机制。2009年,方海等<sup>[86]</sup>以玻璃纤维树脂面板与泡桐木芯材制备了一种用于快速拼装道面垫板的夹芯结构材料;继而在2012年,陈林等<sup>[87]</sup>又研究了以泡桐木作为芯材,玻璃纤维增强塑料(glass fiber reinforced plastic, GFRP)、竹作为面层的夹层梁试件的弯曲性能。2012年,韩超<sup>[88]</sup>研究了木质单板-浸渍蜂窝纸芯夹层复合材料、木塑板-浸渍蜂窝纸芯夹层复合材料及木塑发泡夹芯复合材料在冲击、侧压、弯曲等方面的性能。2012年,郭禾苗<sup>[89]</sup>基于质量功能展开(quality functional deployment, QFD)和发明问题解决理论(theory of inventive problem solving, TRIZ)进行新型木质吸声板的研究,制备了面穿孔单层及双层蜂窝夹芯木质吸声板。

1993年,Lakes<sup>[90]</sup>提出分层蜂窝结构,研究发现它的塑性强度是同等密度普通材料的3.8倍。Kawasaki等制备了以木质层板作为面板、以低密度纤维板作为芯层的夹层板,作为木质基结构嵌入用的墙体和楼板,并研究了其面内剪切性能、隔热和保温性能<sup>[91, 92]</sup>,以及不同面板材料、面板厚度和芯层密度对其力学性能的影响<sup>[93]</sup>,试验结果表明,这种夹层板有足够的厚度,其隔热性能优于保温性能,且质轻,并具有足够的胶接强度和很好的尺寸稳定性,特别适用于轻型结构的结构嵌入部分。2007年,Kljak和Brezović<sup>[94]</sup>研究了由三层胶合板面板与聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)泡沫芯子组成的夹芯材料的弯曲性能,分析了胶合板中三层单板的厚度比对材料性能的影响。2010年,Atas和Sevim<sup>[95]</sup>研究了轻木芯子与PVC泡沫芯子(以环氧树脂基玻璃纤维复合材料为面板)在冲击载荷下的性能。2011年,Fernandez-Cabo等<sup>[96]</sup>以低密度纤维板为芯子、定向刨花板(oriented strand board, OSB)为面板制备了一种夹芯材料用作建筑材料,并分析了这种材料的剪切性能。2011年,Banerjee和Bhattacharyya<sup>[97]</sup>使用三层胶合板制备了一种波纹状芯子,并用三层胶合板作面板制备成了夹芯结构,同时分析了其面外剪切性能及在载荷下的破坏形式。2011年,Chen等<sup>[98]</sup>对应用于家具中的蜂窝夹芯结构板材进行了弯曲蠕变性能的研究,这种板材以胶合板、中密度纤维板或硬纸板为面板,以牛皮纸蜂窝作为芯子制备而成。2013年,Sargianis等<sup>[99]</sup>研究了天然材料基夹芯复合材料的振动阻尼和吸音性能,这种夹芯材料的面板采用棉纤维或竹纤维的乙烯基酯树脂复合材料,芯层分别采用Rohacell硬质泡沫或轻木材料,研究者将其与环氧树脂基碳纤维复合材料夹芯结构的性能进行对比,以期将其应用于民用飞机中。Reddy等<sup>[100]</sup>制备了两种以丝棉木作为面板、铝蜂窝作为芯层的夹层板,分别为I型和II型,并研究了其在静态载荷和低速冲击载荷作用下的能量吸收响应。试验表明,这种夹层板的能量吸收能力随着动态载荷的增加而增大。在低速冲击载荷条件下,I型夹层板较II型夹层板具有更好的能量吸收能力。O'Loinsigh等<sup>[101, 102]</sup>研究了用插入圆棒榫的方法来进行连接的全尺寸木梁的力学

性能。尽管这些木质夹层结构有效地降低了其自身的重量，但其芯层的封闭性设计限制了多功能化的实现。

## 1.5 本书主要研究内容

本书主要分为三部分，第一部分为第 1 章，概述了木质（生物质）工程材料及点阵结构的研究现状，第二部分为第 2~5 章，主要涉及木质基点阵夹芯结构力学性能的研究，第三部分为第 6~9 章，主要涉及菠萝叶纤维点阵圆筒结构的力学性能研究。

第二部分的研究，是基于一种相互连通的大空间设计，在木质夹层结构的基础上，运用木质复合材料来制备木质基点阵夹芯结构。选取定向刨花板、单板层积材和桦木锯材作为点阵夹芯结构的面板，并用无损评价的方式来进行优选；选取桦木圆棒棒作为点阵夹芯结构的芯层材料（点阵柱），并通过正态测试的方法来进行优选。本书研究的点阵夹芯结构的拓扑形式主要是直柱型、倾斜型和 X 型 3 种。通过面板材料、圆棒棒和拓扑形式的不同组合来分析其平压性能、剪切性能、弯曲性能与侧压性能，并与理论模型作对比。最后对木质基点阵夹芯结构的其他制备工艺、可赋予的功能和应用进行了展望。

第三部分的研究，主要在探索一种新型的生物质工程材料，将天然纤维与点阵圆筒空心结构的设计相结合，分析探索了点阵圆筒结构平压性能，希望能够得到一种轻质高强、具有较高的比强度和比刚度，同时可以在连通空间中配置功能性材料的结构，以期用于现代木结构建筑等领域，如地板、柱子等。主要研究包括：以菠萝叶纤维作为增强体，以酚醛树脂作为基体，采用缠绕法制备菠萝叶纤维点阵圆筒结构，并分析测试菠萝叶纤维增强复合材料的弹性参数；探索菠萝叶纤维点阵圆筒结构的平压性能，分别进行试验测试、理论分析与有限元分析，并进一步对结构参数进行分析优化；采用试验测试与有限元分析相结合的方式，分析探索不同胞元构型与圆筒层数对菠萝叶纤维点阵圆筒平压性能的影响；以菠萝叶纤维和玻璃纤维作为增强体，以酚醛树脂和改性的环氧树脂为基体，采用一体成型的缠绕法，以不同的夹芯组坯方式制备点阵圆筒结构，并对其平压性能进行分析。