

ZHUCAI HUAXUE YU LIYONG

竹材化学与利用

刘 力 俞友明 郭建忠 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

竹材化学与利用

刘力 俞友明 郭建忠 编著

浙江大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

竹材化学与利用 / 刘力, 俞友明, 郭建忠编著. — 杭州: 浙江大学出版社, 2006. 10

ISBN 7-308-04983-3

I. 竹... II. ①刘... ②俞... ③郭... III. ①竹材—化学性质②竹材—综合利用 IV. S781.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 122945 号

竹材化学与利用

刘力 俞友明 郭建忠 编著

责任编辑 徐素君

出版发行 浙江大学出版社

(杭州天目山路 148 号 邮政编码 310028)

(E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 浙江大学出版社电脑排版中心

印 刷 浙江大学印刷厂

开 本 787mm×960mm 1/16

印 张 10.75

字 数 234 千

版 印 次 2006 年 12 月第 1 版 2006 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-308-04983-3/S·034

定 价 16.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话 (0571)88072522

前 言

竹子是陆地森林生态系统的重要组成部分,具有分布广、速生丰产、再生能力强等特点。中国地处世界竹子分布中心,是世界上竹类资源最丰富的国家,竹材、竹笋产量与竹业总产值位居世界第一,是全球第一产竹大国,素有“竹子王国”之称。20世纪90年代以来,我国竹子生产得到迅速发展,竹林面积、竹子质量、竹业产值都显著提高,已形成从资源培育到加工利用的一个完整产业链,成为山区农民致富的重要途径。目前国内竹子研究和开发利用水平很不平衡,栽培技术、竹林经营等研究已达到国际领先水平,但在利用竹子资源开发高附加值的化工产品等方面的研究还不够深入。

本书简要介绍竹类资源的分布、竹类植物的形态和解剖特征。着重论述竹材的化学组分特别是纤维素、半纤维素和木质素三种主要成分的结构、性质及其利用,以及各种化学成分与竹龄之间的相互关系;竹材纤维制备、特征和利用;竹材的热解工艺、产物和利用。此书的出版,为利用竹材内所含丰富的纤维素、半纤维素、木质素和非细胞壁提取物等化学成分生产高附加值的竹化工产品提供基础理论平台,对促进竹林的丰产培育,进一步带动农民“以竹脱贫”具有现实意义。

本书可供广大相关科技工作者、生产与技术人员参考,也可供大专院校相关专业师生作为教材或参考用书。

作 者

2006年10月

目 录

第一章 竹材的基本特征	1
1.1 竹类植物的形态特征	1
1.2 竹类植物根和秆的解剖特征	6
1.3 竹材的物理力学性质	9
第二章 竹材的化学成分	18
2.1 竹材的主要化学成分	19
2.2 竹材少量化学成分	22
2.3 竹类原料的化学组成实例	24
第三章 木质素	31
3.1 概 述	31
3.2 木质素的分离与研究	31
3.3 木质素的化学构造	44
3.4 木质素的化学性质	63
3.5 木质素的高聚物性质	79
第四章 纤维素	83
4.1 纤维素大分子的结构	83
4.2 纤维素的化学性质	90
4.3 纤维素的物理性质	101
第五章 竹材半纤维素	108
5.1 半纤维素概述	108
5.2 半纤维素的分离与化学分析	111
5.3 半纤维素的化学性质	121
第六章 竹材制浆造纸	127
6.1 概 述	127
6.2 土法造纸	132

6.3 竹材化学制浆和机械造纸	135
6.4 现代竹子制浆、打浆造纸技术与原理	141
第七章 竹子保健食品及药用	149
7.1 嫩竹提取物的应用	149
7.2 竹笋的利用	155
7.3 竹酒、竹饮料	159
7.4 竹子的药用价值	161
参考文献	165

第一章 竹材的基本特征

1.1 竹类植物的形态特征

竹子属于禾本科植物,具有禾本科植物的共同特征,然而它在营养器官的外部形态、花和果实等生殖器官的结构以及生长发育规律等方面的特殊性,使其独自形成一个特殊类群——竹亚科,即为多年生常绿单子叶一次性开花结实植物。竹类植物的形态特征可从地下茎、竹秆、枝、叶和箨、花和花序、果实和种子诸方面加以论述。

1.1.1 地下茎

根据竹子地下茎的分生繁殖特点和形态特征,将其分为如下几个类型(图 1-1)。

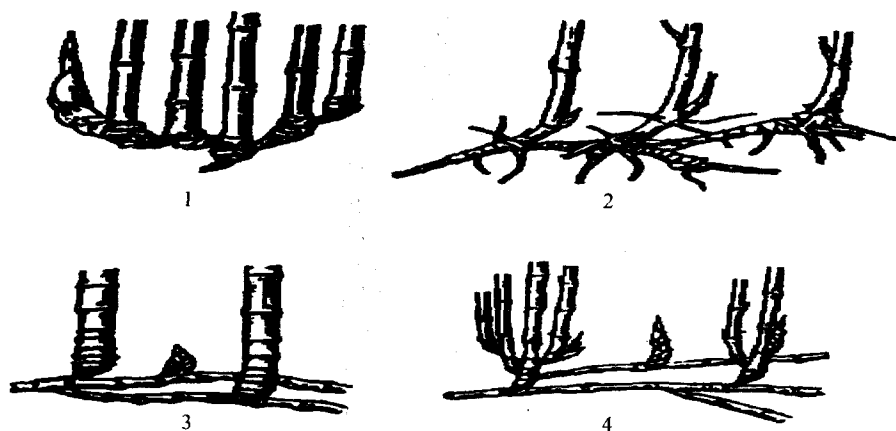


图 1-1 地下茎的类型

1. 合轴丛生型 2. 合轴散生型 3. 单轴散生型 4. 复轴混生型

1. 合轴型

地下茎仅由秆柄和秆基两部分构成,秆基上的芽直接萌笋成竹,它们一般不能在地下作长距离蔓延生长,新竹以细短的秆柄与母竹相连,形成秆茎较密集的竹丛。具有此种繁殖特性的竹类,称为丛生竹,如龙竹、青皮竹、慈竹等。但有的种类,秆柄可延长生长形成假鞭,笋芽在远离母竹的地点出土成竹,秆成散生状,称为合轴散生竹类。这种假鞭一般为实心,节上无根无芽,仅包被着叶性鞘状物,如箭竹、泡竹等竹种。

2. 单轴型

此种竹类的地下茎包括细长的竹鞭、较粗的秆柄和秆基三部分。秆基无芽或芽不直接出土成竹,而是先形成具有顶芽和侧芽,节上长不定根,并能在地下不断地延伸竹鞭。其竹鞭的顶芽,一般不出土成竹,其侧芽有的可直接出土成竹,有的又形成新的竹鞭。因此,地面的竹秆之间距离较长,呈散生状态,并能逐步发展成林。单轴型竹类的竹鞭,因具根和芽,可形成竹笋和新鞭,与合轴型无芽无根的假鞭有本质区别,所以常常被称为真鞭,与假鞭相对。具有此种繁殖特性的竹类称为单轴散生竹类,如毛竹、大节竹等竹种。

3. 复轴型

兼有合轴型和单轴型地下茎的特性,秆基上的芽既可直接萌笋成竹,又可长距离延伸成竹鞭,再由鞭芽抽笋成竹,因此地面竹秆为混生状。具有此种繁殖特性的竹类称为复轴混生竹类,如箬竹、苦竹、筴竹、方竹等竹种。

1.1.2 秆

秆是竹类植物最重要的部分,自上而下分为秆茎、秆基、秆柄三个部分(图 1-2)。

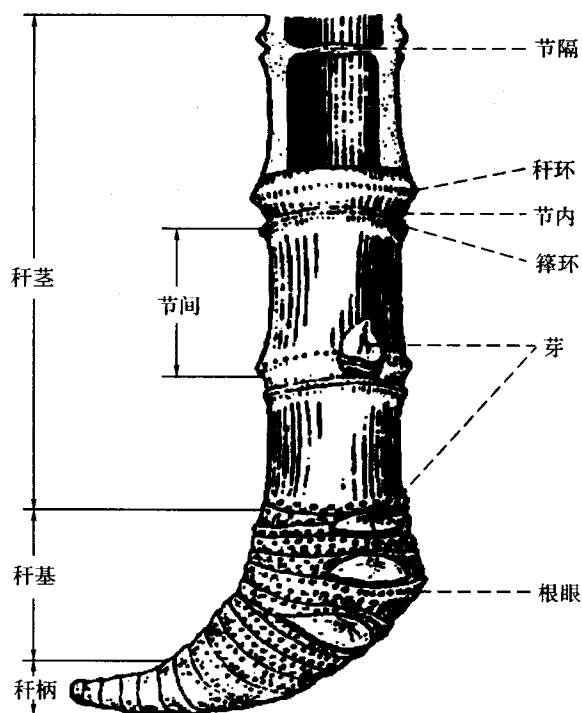


图 1-2 秆的构造

1. 秆茎

即地上部分,是竹类的主体。秆茎具有明显的节和节间,节间中空,称为竹腔。秆茎多为通直,其上抽枝长叶。每节具二环,下为箨环,是秆箨脱落后留下的环痕;上为秆环,是居间分生组织停止生长后留下的环痕,常隆起成脊;二环之间部分称为节内,其内具一木质横隔称节隔,其外着生芽或枝。不同竹种之间,其节、节内及节间的形状和长度等常有显著区别。竹类植物节间的形状和长度变化较大,一般为圆筒形,呈绿色;但有的略呈方形,有的呈龟甲状,有的为紫色,有的为黄色或具条纹。沙罗竹节间较长,约为 70~80cm,最长 100cm 以上,这些特殊形态大大提高了竹类的观赏和利用价值。

2. 秆基

位于秆茎的下部,通常埋于地下,一般比秆茎粗,由数节至十几节组成。其节间短缩粗壮,节上长芽(称笋芽或笋眼),生根。有的竹种秆基上的芽可直接萌笋成竹,有的只能先形成细长的地下茎(称竹鞭),再由竹鞭的侧芽萌笋成竹。由秆基各节生出来的根,称竹根;由竹鞭节上生发的根,称鞭根(从而形成独立而发达的根系,起着从土壤中吸收水分和肥料、固定、支撑的作用)。秆柄、秆基和竹根合称为竹莖。

3. 秆柄

位于竹茎的最下部分,与竹鞭或母竹的秆基相连,节间极短而细小,一般由 10 余节构成,长度为几厘米至十几厘米,有的竹类秆柄可延长达 1 米以上而成假鞭,如玉山竹属和泡竹属就有比较典型的假鞭。秆柄不生根又无芽,但极强韧,俗称“螺丝钉”。

秆的生长习性因竹种而异,一般可分为直立型、斜依型、攀援型。直立型的典型代表是泰竹,其秆劲直而不弯曲,分枝较高而呈密丛状,秆型十分优美;有的则梢头变弯曲或下垂,如慈竹、甜龙竹。斜依型的代表是牡竹属,其秆多偏斜,既不直立亦不攀援。攀援型的代表为藤竹,其秆极长,主枝发达可代替主秆生长或呈藤本状攀援于其他乔木之上,或呈蔓生状。

1.1.3 枝

竹枝由秆茎上的芽发育而成,是附着叶片的器官。竹秆可以看成是地下茎的直接分枝或一级分枝,而竹枝可看成是二级或二级以上分枝。竹枝也由中空的节间和具横隔的节组成,节上也可具有类似于秆环的枝环。竹枝基部若干节,往往膨大,节间缩短,形成枝莖;且容易产生不定根,生产上可用以代替竹秆,进行育苗造林。竹类分枝类型各异,不同竹种常常具有固定的分枝类型,因此分枝类型成为竹类识别和分类的重要依据之一。一般分为下列 4 种类型(图 1-3)。

1. 一枝型

铁竹属、箬竹属,每节一分枝,有时上部几节可具三分枝或三分枝以上。

2. 二枝型

刚竹属、异枝竹属,每节具一粗一细的二分枝。通常毛竹为典型的二分支,即竹秆每

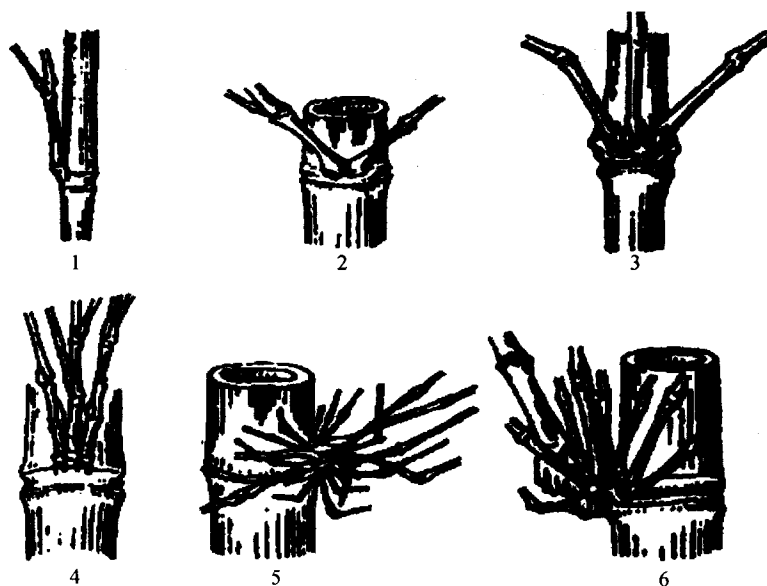


图 1-3 分枝的类型

1. 一枝型 2. 二枝型 3. 4. 三枝型 5. 多枝型(主枝不突出) 6. 多枝型(主枝突出)

节生二枝，一主一次，长短大小有差异。竹冠基部的最下盘枝，则只有一个主枝，这主枝往往和毛竹的竹鞭方向一致，可作为寻鞭挖母竹的依据。

3. 三枝型

箬竹属、方竹属、香竹属、大节竹属和唐竹属，每节具粗细相近三枝，有时竹秆上部各节可成为 5~7 分枝。

4. 多枝型

每节具多数分枝，根据主枝发展状况可分为：

- (1) 无主枝型：如慈竹属，主枝不发达，各侧枝均较细，相互间无明显差异；
- (2) 一主枝型：如龙竹、麻竹，主枝较发达，而梨藤竹属则主枝极发达，有时可代替主秆生长；
- (3) 三主枝型：如黄竹和一些箬竹属种，除多数较细的侧枝外，还形成发达的三个主枝。

1.1.4 叶和箨

竹类植物的叶器官有营养叶和茎生叶两种。

营养叶即正常的叶，二列着生于末级小枝的各节，由叶片、叶柄、叶鞘、叶舌和叶耳组成。叶片长椭圆形至披针形，中脉突起，两边有与中脉平行的侧脉若干对，侧脉间有小横脉，呈方格状或网状；叶柄较短，一般为 3~10mm；叶鞘彼此依次覆盖，并最终包裹小枝，

其先端与叶柄连接处有一关节,叶片及叶柄即从此关节处脱落;叶鞘先端中部的内侧,常有一膜质片,称为叶舌;叶鞘的先端两侧常具有耳状突起称叶耳,其边缘一般形成发达的毛状物,称纤毛。

茎生叶,即“笋壳”,特称为箨或秆箨,是一种变态的叶,生于竹秆或主枝的各节,对笋和幼嫩的节间起保护作用,节间停止生长后逐渐脱落,少数可宿存达数年之久。

其实在同一竹秆上,秆箨的形态是逐渐发生变化的,从秆的基部到梢部,由于节间越来越窄,箨片也变得越来越窄、越来越长,箨片的颜色也由非绿色逐渐变成绿色,最后在竹秆梢部最先端,秆箨几乎变成了叶,所以用动态的观点看,箨和叶是相对的。因此,作为竹分类依据之一的秆箨,必须指明其着生部位,一般选择竹段中下部已发育完全的秆箨作为分类描述的依据。

1.1.5 花和花序

1. 花

竹类植物的花不同于一般被子植物的花,它和其他禾本科植物的花基本一致,是以小穗为单位的。一个小穗含有1至数朵小花,每个小穗基部具有2~5枚颖片,颖片的腋部不生花,每小花具2枚稃片,外面的一片称外稃,里面的一片称内稃。

2. 花序

根据发生和形态构造的不同,竹类植物的花序一般可分为两种类型,即有限花序和无限花序。

有限花序:具有花序总梗,此梗上延成为花序主轴,该轴实心,结构均匀一致,其分枝有圆锥,总状或近于穗状等形式,在花序轴的每一等级分枝的顶端着生一个真小穗。有限花序在较短的时间内便一次性发育形成,以后该花序不再以潜伏芽形式保留分生组织,所以有限花序还可以称为有限制的一次发生的真花序,或直接称为真花序,这种花序为部分竹类和所有竹亚科之外的禾本科植物所共有,是禾本科中较进化的花序类型。散生竹中常见。

无限花序:由假小穗着生在各级营养枝上构成,此种营养枝由于具有空心的节间,而与真花序的花序主轴有本质的不同,而且其假小穗基部颖片腋内具潜伏芽或形成一个新的假小穗,同样的,后者还可以再形成新的假小穗。因此,无限花序的形成和发育可以延续很长时间,有的可延续几年之久,所以这种花序又被称为无限制的续次发生的假花序,或直接称为假花序。假小穗无柄,其长度一般不超过3cm,因此,当假小穗的级数逐渐增加时,其所着生的营养枝的节部便可形成一个密集簇生或球形头状的假小穗丛。在禾本科中,这种假花序目前仅在竹类植物中有发现,是原始的花序类型。丛生竹中常见。

1.1.6 果实和种子

1. 果实

竹类植物的果实有颖果、浆果和坚果状果实,其果实不开裂,仅具1枚种子。

竹类果实的顶端,通常还具由花柱发育而成的喙,喙或长或短,或粗或细,在不同的种类间有明显差异。

2. 种子

竹类的种子,不论是颖果类还是非颖果类,其种皮都很薄,一般仅一层细胞。颖果类的种子,由于种皮与果皮完全愈合而丧失了一般种皮的形态和功能。非颖果类的种子,由于其果皮较厚,且不开裂,种子不存在直接与外界接触所面临的问题,其保护作用完全由果皮承担,所以种皮也很薄,且无其他附属物。

近些年来,不少竹类学者开展了对竹类种子成分及与种子的萌发、生长、抗性相关方面的研究,并取得了很好的成果。

由于竹类不常开花,得到种子很不容易,因此,人类对竹类果实和种子的认识,相对来说,还不是很全面和深入,一些基本问题还有待解决。

1.2 竹类植物根和秆的解剖特征

1.2.1 根的解剖构造

竹类植物的根都是不定根,无次生生长和次生构造,其解剖构造包括表皮、皮层和维管柱三部分(图 1-4)。

1. 表皮

为竹类根的最外层,其细胞大,呈圆形或不规则形,为一层连续的薄壁细胞。幼根的表皮细胞常向外突起形成根毛,吸收水分和无机盐,此后表皮丧失功能,逐渐脱落,后由外皮层或周缘纤维取代完成保护作用。

2. 皮层

表皮内方到中柱之间的全部组织称为皮层。根据存在部位和结构特点,还可以分为外皮层、气腔、内皮层等。起支持、输导作用。

(1) 外皮层:指表皮内方的一层细胞。丛生竹的外皮层细胞不加厚,散生竹的外皮层细胞壁除内切向壁不加厚外其余全部加厚,即呈内向“C”字形加厚。

(2) 气腔:由皮层薄壁细胞经裂生作用形成的通气组织,气腔的形成与竹类多雨潮湿

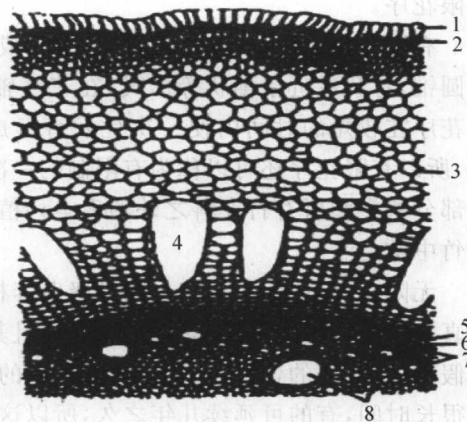


图 1-4 毛竹根的横切面

1. 表皮
2. 厚壁组织
3. 皮层薄壁组织
4. 气腔
5. 内皮层
6. 中柱鞘
7. 筛管
8. 导管

的生境有关。

(3)内皮层:为皮层的最内层。内皮层结构上最特殊之处是细胞壁极度加厚,这种加厚,又与根对无机盐的选择吸收有关。幼根中,位于原生木质部顶端处的内皮层细胞壁不加厚,成为通道细胞(为水分进出的通道),随着根的吸收功能的散失,通道细胞壁也逐渐加厚,而与其他内皮层细胞相一致。

3. 维管柱

指内皮层以内的整个部分,在整个横切面中所占比例会因属、种不同而有所差异。丛生竹的维管柱所占比例较大,而散生竹所占比例较小。维管柱的外面1~2层排列整齐而紧密的细胞称为中柱鞘。中柱鞘细胞幼嫩时为薄壁细胞并有潜在的分生能力,侧根由它产生。此后中柱鞘细胞的细胞壁逐渐加厚并失去分生能力。中柱鞘之内,从外向内依次散生着孔径由小到大的导管,外围的导管之间分布着筛管。维管柱的中央为髓部,一般无髓腔,但少数竹种如毛竹,可形成髓腔。

有些竹种中会有不同程度的例外,这里只是竹类根构造的一般情况。

1.2.2 秆的解剖构造

竹秆具有明显的节和节间,节间中空,称为髓腔;髓腔周围的壁称为竹壁。生产上习惯将竹壁自外而内分为竹青、竹肉、竹黄三个部分。解剖学上则将竹壁分为表皮、皮层、基本组织、维管束和竹腔壁等五个部分。

1. 表皮

表皮是竹壁的最外一层细胞,由长形细胞和短形细胞纵向相间排列而成,细胞的外切向壁角质化,形成发达的角质层并具坚硬的矿质突起,以加强表面的硬度。表皮上还分布着少数气孔。

2. 皮层

表皮之内无维管束分布的部分称为皮层,其细胞呈柱状,纵向排列,横切面上呈椭圆形或矩形,一般3~7层。皮层幼嫩时常含叶绿体,使竹秆呈现绿色,皮层与内面的基本组织不能决然分开。生产中所称的竹青包括了表皮和皮层。

3. 基本组织

指皮层以内的薄壁细胞,其间星散分布着维管束。外围部分的基本组织(在两个维管束之间的部分),与皮层自然相连,两者间没有绝对的界线。基本组织的细胞,在竹壁横切面上,由竹青面到竹黄面呈现着小一大一小的变化趋势。

4. 维管束

分散在基本组织中。一般的维管束由外围的维管束鞘和内部的木质部、韧皮部构成(图1-5)。

木质部靠竹黄面,呈“V”字形排列,两侧各为一个大型的导管,称后生木质部;“V”字的底部为原生木质部。韧皮部靠竹青面,由孔径较大的筛管细胞及插入其间的孔径较小

的伴胞和薄壁细胞构成。筛管细胞的壁未加厚。所有导管细胞之间以及木质部与韧皮部之间,均由细胞壁木质化的薄壁细胞所分隔,这些薄壁细胞一般明显小于基本组织中的薄壁细胞。木质部与韧皮部之间无形成层。

维管束鞘由围绕在木质部与韧皮部外围的纤维细胞构成,是竹壁中重要的机械组织,通常约 3~6 层,其细胞断面小,高度木质化,因而胞腔细小。

纤维股的有无,以及维管束鞘的情况,在不同竹种之间以及同一竹株不同段位之间乃至同一竹壁切面上的不同部位都有变异。这与竹子的系统分类和竹材的物理力学性质都有密切关系,这是近年来研究得较多的内容之一。

竹秆由基部向梢部,随着竹壁变薄,维管束的密度也逐渐增加。以龙竹为例:下部竹壁厚 17.7mm,平均维管束密度为 187 个/cm²;中部竹壁厚 8.33mm,平均维管束密度为 262.7 个/cm²;上部竹壁厚 5.9mm,平均维管束密度为 322.3 个/cm²。

5. 竹腔壁

竹壁的最内部分,即一般所说的竹黄,无维管束分布,由数层至 10 余层高度木质化的石细胞组成,厚度约 0.3~1.0mm,细胞排列紧密,硬度大。

1.2.3 节部的解剖构造

具有明显节部的形态构造是竹子不同于其他植物的一个显著特点。竹节由秆环、箨环、节内和节隔组成。由于秆环上生箨、节内生芽和节隔的产生,使节部的解剖构造比节间的秆壁复杂得多,其最显著的不同是维管束会发生弯曲、交叉、相互连接等。

维管束在箨环之下至少 5mm 处开始分叉,在秆环之上分叉才消失。大多数秆壁中的纵向维管束直接穿过节部,但是相互之间在节部处由分叉的横向、近横向的维管束多次缠绕连接起来。节部维管束周围的纤维组织的数量显著偏少,而且维管束内木质部与韧皮部的位置也由于维管束的扭曲而发生各种变化。节部的导管和纤维随维管束的分叉也发生分叉,且基本组织的细胞形态也随之弯曲和不规则。导管细胞的长度和直径较节间的短而细。

由于竹子节间内的维管束互相分离,而且又不具有双子叶植物那样的维管射线系

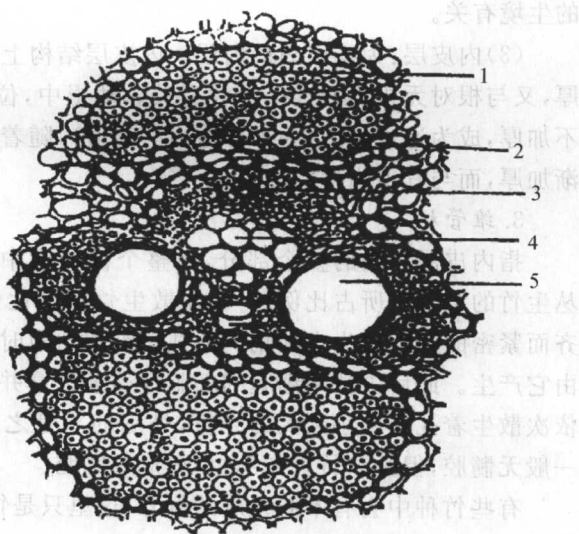


图 1-5 维管束的构造

1. 纤维股 2. 薄壁细胞 3. 维管束鞘
4. 韧皮部 5. 后生木质部导管

统,因此,物质的横向运输在节间难以进行。竹子节部维管束的反复分叉和相连,以及筛管细胞侧壁上的大量筛域,使竹子体内物质的横向运输能在节部先分化。而且节部的纤维数量虽然减少,纤维长度也变短,但由于纤维分叉,维管束弯曲,相互缠结以及基本组织的细胞形态不规则而相互镶嵌,使得竹子节部的力学强度仍然很高,尤其是抗劈强度大大增加,这对于竹秆细长、节间中空且极易劈裂的竹子来说是十分必需的。

1.3 竹材的物理力学性质

1.3.1 竹材的物理性质

1. 竹材容积重(密度、比重)

竹材是多孔性物质,由细胞壁物质、显微孔隙和超微孔隙构成。其密度种类除竹材容积密度外,尚有竹材胞壁密度和竹材物质密度。竹材容积密度为单位体积竹材的质量,该体积包括细胞壁物质、显微孔隙和超微孔隙。竹材胞壁密度为单位体积细胞壁的质量。竹材物质密度为单位体积竹材物质的质量。竹材胞壁密度通常为 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ 。竹材物质密度变化在 $0.7\sim 1.2\text{g}/\text{cm}^3$ 之间。竹材含水率不同,其容积重也不同。根据竹材含水率状况的不同,分基本密度、生材密度、气干密度、绝干密度等。

基本密度=绝干材质量/生材体积

生材密度=生材质量/生材体积

气干密度=气干材质量/气干材体积

绝干密度=绝干材质量/气干材体积

为了便于比较,常用竹材充分吸水后的重量与其烘干后的最大体积之比,称为竹材的公定容积重,或称基本比重。同一竹材的烘干容重比公定容积重的值大。

竹材的容积重与其力学性质关系密切。容重大,力学强度就大;容重小,力学强度就小。因此,竹材的容积重是反映竹材力学性质的重要指标。

(1) 影响竹材容重的因素

①竹秆部位 竹秆自基部至梢部,容重逐步增大。同一高度上的竹材,竹青的容重比竹黄大;有节部分比无节部分的容重大。也就是说,竹秆上部和竹壁外侧容重大,竹秆基部和竹壁内部容重小。主要原因是:竹秆上部和竹壁外侧的维管束密度较大,导管孔径较细,所以容重较大;竹秆下部和竹壁内侧的维管束密度较小,导管孔径较粗,所以容重较小(表 1-1)。

表 1-1 毛竹竹秆不同部位竹材的容重和顺纹抗压强度

竹秆部位	1/10	3/10	5/10	7/10	9/10
容积重/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	0.593	0.633	0.649	0.702	0.740
顺纹抗压/MPa	61.56	69.79	71.95	79.89	83.10
实验次数	14	14	14	14	14

②竹子年龄 竹笋长成幼竹后,竹秆的体积不再变化。而竹材的容重则随年龄的增长而不断提高,1年生容重 $0.43\text{g}/\text{cm}^3$,2年生 $0.56\text{g}/\text{cm}^3$,3年生 $0.61\text{g}/\text{cm}^3$,4年生 $0.63\text{g}/\text{cm}^3$,5年生 $0.62\text{g}/\text{cm}^3$,6年生 $0.63\text{g}/\text{cm}^3$,7年生 $0.62\text{g}/\text{cm}^3$,8年生 $0.66\text{g}/\text{cm}^3$,9年生 $0.61\text{g}/\text{cm}^3$,10年生 $0.61\text{g}/\text{cm}^3$ 。上述数据说明竹材的容重,幼竹最小,1~6年生逐步提高,5~8年生稳定在较高的水平上,8年生以后有所下降。引起这一现象的主要原因是:竹材细胞壁及内含物是随年龄的增长而逐渐充实和变化的。竹材容重随年龄变化的规律是确定竹子合理采伐年龄的理论根据之一。

③立地条件 在气候温暖多湿、土壤深厚肥沃的条件下,竹子生长粗大,维管束密度低,竹材组织较疏松,容重较低。在低温干燥、土壤较差的地方,竹秆细小,维管束密度高,竹材组织较充实,容重较高。因此,立地等级愈好,竹材组织愈疏松,容重愈低;立地等级愈差,竹材组织愈紧密,容重愈高(表1-2)。

表1-2 立地条件与竹材公定容重、维管束密度的关系

立地等级	I	II	III	IV	V
公定容积重/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	0.591	0.597	0.603	0.602	0.603
维管束密度/ $\text{个} \cdot \text{cm}^{-2}$	187	196	222	240	211

(2)竹材的公定容积重与抗压强度的关系

①公定容积重与抗压强度的关系 根据研究,竹材的公定容积重量与其顺纹抗压强度之间有密切关系。其关系式为:

$$D_w = 155R_y - 34$$

式中: D_w 为顺纹抗压强度(MPa); R_y 为公定容积重量(g/cm^3)。

②竹材的容积重与公定容积重的关系 竹材含水率(P)随公定容积重量(R_y)的提高而减少。容积重(R_w)与竹材公定容积(R_y)和含水率(P)之间的关系式为:

$$R_w = \frac{R_y + 0.07 + (8 + 3.5R_y)P}{10000}$$

$$R_y = \frac{R_w + 0.0388}{(1 + 0.00735)P} - 0.1088$$

2. 竹材含水率

竹材中水分重量占绝干物重量的百分率,称为竹材的含水率。按竹材中水分的存在状态不同可分为:①吸着水,存在于竹材细胞壁中的结合水;②化合水,存在于竹材胞壁成分中的水分;③自由水,存在于竹材细胞腔中的水分。

纤维饱和点含水率:湿竹材放置在空气中干燥时,首先蒸发自由水,当自由水蒸发完毕,而吸着水尚在饱和状态时称纤维饱和点。此时的竹材含水率称为纤维饱和点含水率。纤维饱和点含水率等于吸着水的最大量。竹材纤维饱和点含水率为35%~40%,纤

维饱和点含水率对竹材物理力学性质影响很大。

新鲜竹材的含水率与竹龄、部位和采伐季节等有密切关系。一般来说,竹龄愈老,竹材含水率愈低;幼龄竹材含水率高。Ⅰ度毛竹新鲜竹材含水率 135%,Ⅱ度(2~3年生)为 100%,Ⅲ度(4~5年生)为 82%,Ⅳ度(6~7年生)为 77%。竹秆自基部至梢部含水率逐步降低,从基部 1/10、2/10、3/10、4/10、5/10、6/10、7/10、8/10、9/10 各部位依次为 97.1%、78.8%、74.2%、66%、61.5%、56.6%、52.8%、48.8%、45.7%。

竹壁外侧(竹青)含水率比中部和内侧(竹黄)低。毛竹新鲜竹材竹壁外侧含水率为 36.7%,中部为 102.83%,内侧为 105.35%。夏季采伐的竹材含水率最高(70.41%),其次是秋季(66.54%)和春季(60.11%),最低是冬季(59.31%)。因此,新鲜竹材一般含水率在 70%以上,最高可达 140%,平均为 80%~100%。

3. 干缩性

(1)竹材的气干过程 新鲜竹材的气干过程与干燥时间、气温、空气湿度和饱和积差等($\sum dt$)有密切的关系。鲜竹材置于空气中,水分蒸发速度模切面最大(100%),其次是弦切面(35%),径切面(34%)和竹黄(32%),竹青最小(28%)。

(2)竹材的干缩性 新鲜竹材经过天然或人工干燥后,逐渐失去水分,竹材的径、弦、高向的尺寸和体积等产生收缩的现象称为干缩性。一般竹材的收缩率比木材要小。但是,竹材的不同方向收缩率有显著的不同。竹材干缩性可用于缩率(S)和干缩系数(K)表示。

$$S = \frac{(A-B)}{A} \times 100\% \quad K = \frac{S}{W}$$

式中: S 为干缩率; A 为新鲜竹材的径、弦、高向和体积的尺寸; B 为绝干竹材的径、弦、高向和体积的尺寸; K 为干缩系数; W 为竹材纤维饱和点含水率(%)。根据同济大学的研究,4年生的毛竹竹材含水率为 40%时,收缩以弦向为最大,收缩率为 4.5%;径向次之,为 3.0%;高向最小,仅为 0.32%。弦向收缩中竹青最大,竹壁中部次之,竹黄最小;若含水 40%时,竹青收缩为 100%,中部为 80%,而竹黄仅 75%。纵向收缩中,竹青最小,中部次之,竹黄最大;若含水 40%时,竹青收缩为 100%,中部为 156%,竹黄为 200%。

竹材体积收缩率比线收缩率大,线收缩率中,竹壁外侧弦向(宽)最大,其次为径向和内侧弦向,高向收缩最小,特别是竹壁外侧的高向收缩率。毛竹竹龄愈小,竹材的弦向收缩率和径向收缩率愈大。弦向收缩率:2年生竹材为 7.45%,4年生为 4.46%,6年生为 3.53%。径向收缩率:6年生为 2.18%。纵向收缩率与竹龄无关,平均值为 0.1%左右(从鲜竹到气干状态)。引起竹材收缩的主要原因是:竹材维管束中导管失水后发生收缩。因此,竹材中维管束分布密的部位,收缩率就大;竹材中维管束分布疏的部位,收缩率就小。由于竹壁外侧(竹青)比内侧(竹黄)的弦向收缩大,因此,竹秆在干燥过程中,常常引起竹壁开裂。