西北林学院学报 2020,35(4):197-204
Journal of Northwest Forestry University

doi:10.3969/j.issn.1001-7461.2020.04.31

节子的性质及其对木材材性的影响

李明月[1],陈东升[2],王雪玉[1],任海青[1*]

(1.中国林业科学研究院 木材工业研究所,北京 100091;2.中国林业科学研究院 林业研究所,北京 100091)

摘　要:树节是指树干内部的枝条基部或枯死枝条形成的结疤,在用材中称为节子。在树木生长过程中节子独特的理化性能对树木的生长有良好的作用。但是在木材加工利用过程中节子的存在严重影响木材性能和加工利用。本研究对节子的构造、物理力学性质、化学性质和检测方法等5个方面研究现状进行了总结。节子的存在对于树木的生长过程中枝条与树干之间最佳连接方式,无论在应力作用还是外部细菌等因素的影响下,节子在树木生长过程中所体现的物理性能和化学性能都有着良好的作用。但是在木材的利用中,节子对于木材力学性能和加工性能的影响巨大,不仅对于刀具损伤较大,在一定程度上降低木材的抗拉、抗压、抗弯性能,同时对于木结构连接部位的力学性能也有一定影响。目前国内外对于板材节子检测的研究较充分,但是对于原木的节子检测研究较少。在有节材力学性能预测方向,得到了较为精准的预测模型。并且通过节子特征、林木密度、树龄、树干特征等对节子进行预测,帮助在树木生长过程中对木材进行改良。现阶段对节子的研究主要集中在力学性能和检测等方向,对于节子部位的超微观构造和构造智能性利用等方面相对薄弱,对于节子如何影响木材力学性能的机理并未深入。

关键词:节子构造;木材材性;节子检测

中图分类号:S781.5　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-7461(2020)04-0197-08

Nature of the Knot and Its Impact on Wood Properties

LI Ming-yue[1],CHEN Dong-sheng[2],WANG Xue-yu[1],REN Hai-qing[1*]

(1.*Research Institute of Wood Industry,CAF,Beijing* 100091,*China*;2.*Institute of Forestry,CAF,Beijing* 100091,*China*)

Abstract:Branch knot,which is called knot when it is in timber,refers the base of the branch within the trunk or the left branch base after the branch is removed from the trunk. In tree growth,the unique physical and chemical properties of knot have a good effect on the growth of trees. However,in wood processing and utilization,the existence of knot seriously affects the wood properties and processing and utilization of wood. In this paper,the research status of knot was summarized from five aspects:knot structure,physical and mechanical properties,chemical properties,and detection methods. The existence of knot plays very beneficial roles in the best connection between tree trunk and branches and in tree growth,no matter under the influence of stress or external bacteria and other factors. However,in the use of timber,knot presents huge negative impacts on wood mechanical properties and processing properties. It causes great damage to the wood processing tools,reduces the tensile,compressive,bending properties of wood to a certain extent. In addition,it also imposes destructive effects on mechanical properties of the wood structure connection parts. At present,there are many researches on the detection of plank knot at home and abroad,but few on the detection of log knot. In the aspect of predicting mechanical properties of the woods with knots,some more accurate models were obtained. The knots can be predicted by their characteristics,tree density,tree

收稿日期:2019-09-26　**修回日期**:2019-11-18

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项。

作者简介:李明月。研究方向:木材力学与木结构。E-mail:990372396@qq.com

* **通信作者**:任海青,博士,研究员,博士生导师。研究方向:木材力学与木结构。E-mail:renhq@caf.ac.cn

age and trunk characteristics, so as to improve the wood quality during tree growth. The current knot research interests mainly focused on wood mechanical properties and knot detection. Few are on knot supermicroscopic structure and utilization of structural intelligence, as well as the mechanism that how knot affects wood mechanical properties.

Key words: knots structure; wood properties; knots detection methods

树节是树木生长的正常生理现象，往往存在于树干内部以及枝条的基部，在用材中称为节子，是一种加工利用缺陷。节子分为活节和死节，这是根据节子的质地及其与周围木材的连生程度区分。而根据节子的材质区分为健全节、腐朽节和漏节。枝丫与树冠的连接形成的节子是树木在对抗外力如风、雨、雪等作用最佳的连接方式[1]，节子的独特美感受到人们的喜爱，但是枝丫及木节的存在对于木材的使用有极大的影响，因此通过对木节的形成，形态以及性质进行研究，旨在在树木的生长过程中调控节子数量和分布，优化有节木材的加工和利用，并开发节子连接的仿生学研究。基于国内外对节子的相关研究，对节子的研究现状进行总结，为指导节子生长的调控、有节材检测、有节材高效利用及节子的仿生学的研究提供新的思路。

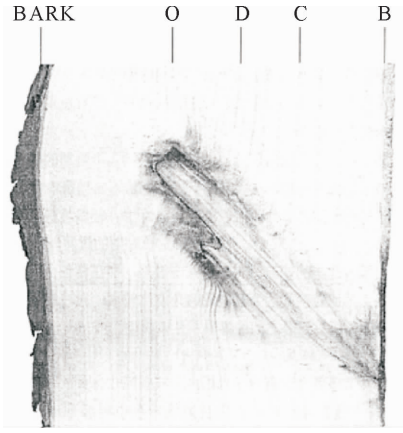
1 节子的构造

节子有 4 个生长发育时期(图 1)：枝条形成到枝条生长停止(B-C)，枝条生长停止到枝条死亡(C-D)，这 2 个阶段即从枝条形成到枝条死亡平均时间为 12 a；从枝条死亡到包藏(D-O)，这一阶段平均时间为 13 a。在节子生长中产生可见年轮的时间平均为 8 a；没有死亡但不产生可见年轮的时间平均为 5 a，大约占枝条生长期限的 38%[2]。S. Hein[3] 基于 41 株欧洲山毛榉中的 717 个节子的相关数据，构建了节子被包藏时间、被包藏部分的直径、角度和疏松节比例模型。大的枝条表现出被包藏时间长、被包藏部分直径大、角度陡峭以及较高的疏松节比例。

1.1 节子的宏观构造

活节是树木活的枝条的基部，活节的组织与其周围的木材组织全部紧密相连，且质地坚硬，不易脱落。死节由树木枯死枝条形成，与周围木材部分脱离或者完全脱离，在木材加工时经常形成空洞，有些死结在环境作用下已经全部或者局部改变其构造[4]。

A. L. Shigo[5] 通过对 12 000 株树木的枝节进行锯解观察，以研究阐明枝节木材连接的构造机理(图 2)。研究表明，在每个生长季节，树干形成层的活动早于枝条形成层并最先在树枝基部环绕生长，随后枝条基部形成层在枝条基部的树干形成层上再环绕生长，依次重复最终在该部位形成一个层状环形构造。枝条与树干大部分管胞细胞在构造上并不相连，只有枝条下侧的一部分管胞组织与树干直接连接，即在一定程度上，枝条并不是真正与树干结合在一起，而是通过枝条基部与树干形成层每年形成的相互覆盖的层状环形构造实现连接的。



注：B：枝条形成时的年龄；C：枝条停止形成年轮时的年龄；D：枝条死亡时的年龄；O：节子愈合(包藏)时的年龄。

图 1 节子剖面[2]

Fig. 1 Section of knot

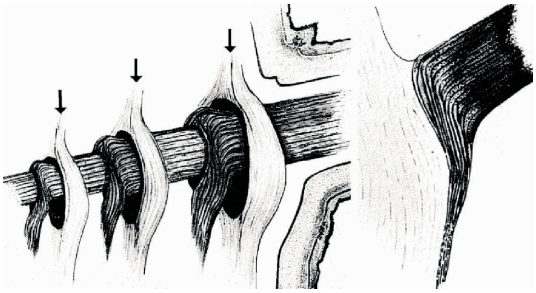


图 2 树枝与树干连接示意图

Fig. 2 A schematic diagram of the connection between branches and trunks

有节子部位的针叶材管胞形态、阔叶材导管形态均有不同程度变化，导管等木质部其他组织，本应该是垂直方向排列，在枝节处呈现出横切面的特征图 1(Shigo)，T. E. Timell[6] 研究证明银杏的应压木部位的管胞缺少 S3 层。

1.2 节子分布

节子是树木生长发育产生的自然现象，节子的数量、分布与树木的生长环境有着密不可分的关系(图 3)。

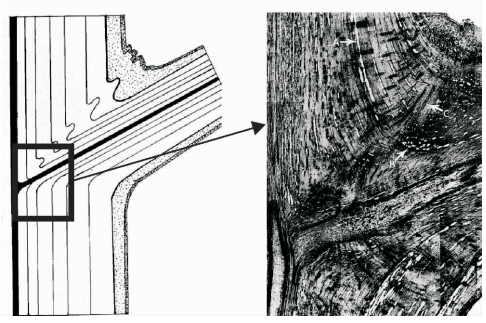


图 3　节子的微观图

Fig. 3　Microstructure of knot

H. Lernieux 等[7]对黑云杉(*Picea mariana*)的节子进行研究表明,树木在生长过程中,尤其是幼龄期,南向接受的阳光较北向充足,树木朝南的节子数量要比分布在北边的多。陈东升等[8]研究了樟子松(*Pinus sylvestris*)人工林的节子分布以及影响因素,结果显示,在同一株树木上节子平均直径的垂直分布趋势是从伐根到大约树高的 45%处逐渐增加,再向上逐渐减小但趋势平稳。节子的尺寸与林木密度密切相关,随着林木密度增加节子直径的最大值减小,且在树干中的位置升高。研究都认为节子的数量、分布与光照和树木的生长条件密切相关。N. L. Osborne 等[9]还应用枝条角度和直径来模拟节子形状,建立削度方程得到树木每年不同高度处的直径,构建枝条角度预测模型,求解方程的数值得到节子髓心 x-y 坐标。同时 G. Trincado 等[10]剖析了 22 年生 34 株火炬松的节子分布,通过构建节子形状模型,实现了不同类型节子材积估算。

2　节子的物理、化学性质

木节作为树木必不可少的一部分,其位置特殊,构造独特。同样节子的物理化学性能也与树干不同,这是节子的独特性也是树木在生长过程中受到外界因素影响体现的智能性。

2.1　物理性能

节子物理性能的独特性主要体现在:密度、干缩湿涨、声传播性能以及环境特性。首先节子作为树木的一部分,其密度与树木整体不尽相同。在同一棵树上树枝部位的密度最大,节子的密度次之,树干的密度最低,这里所说的节子指活节,死节、腐朽节等有不同程度的腐朽或空漏,在这里不做比较。同样雍朝柱等[11]对于杉木(*Cunninghamia lanceolata*)的研究也发现树枝的年轮平均宽度比杉木干材小 69%,气干密度比杉木干材大 70%。而对于节子自身不同位置的密度也不同,王玉荣等[12]对于火炬松(*Pinus taeda*)的椭圆形节疤进行研究表明:节子越靠近枝条部位其密度越高;就节子整体而上部的密度较高,下部木材密度较低,研究发现距髓心 3.5 cm 处其节子上部木材密度高于其中心部位,这可能是此部位已接近枝条基部位置所导致。

节子的构造不同于正常木材,导管、纤维等组织方向改变造成纹理不规则,由于木材的干缩湿胀各向异性,造成节子与周围的木材的各方向的干缩系数不同,破坏了木材的均一性,在干燥时造成木材开裂。节子顺纹方向即单板的厚度方向上的干缩小于单板厚度方向于缩,导致节子处厚度较正常单板厚度大些,干燥过程中干燥机输送机的压力导致活节脱落形成孔洞。节子处的材质与正常材材质差异越大,越易产生孔洞[13]。雍朝柱等[11]对杉木(*Cunninghamia lanceolata*)枝条木材物理性能进行研究,结果表明树枝的体积干缩系数比杉木干材小 48%,差异干缩比杉木干材小 29%。杉木枝条木材在密度和尺寸稳定性方面的性质优于杉木干材,这是树木受到外界的因素的作用,树枝受到更大的力,为了树木稳定的生长而产生的智能反应。

节子对木材中波的传播特征参数如波速有影响,C. C. Gerhards[14]认为虽然应力波的速度通过生节和生节周围的弯曲纹理减慢,这是因为在有横纹和节子的木材中,应力波不以正常波阵面传播,但当节子旁边有大量直纹木材时,节子对木材中应力波的整体速度影响不大。林文树[15]利用超声波和应力波对木材缺陷进行检验,结果表明应力波和超声波的传播时间与节子大小呈负相关,应力波和超声波传播波速及木材弹性模量与节子大小均呈正相关,运用 SPSS 统计软件进行回归分析,得出在超声波中波速、弹模、节子大小的相关系数别为 0.830、0.826 和 0.804。相应的回归方程分别为:$T=49.562+0.179d$,$V=40.287-1.131d$,$E=8.315-0.064\,9d$。在应力波中其相关系数分别为 0.748、0.734、0.835,相应的回归方程分别为:$T=72.034+0.529d$,$V=27.534-0.162d$,$E=3.8-0.051\,5d$。同样的王亚磊等[16]对节子对木材应力波传播速度和弹性模量的影响也进行了研究。结果表明,节子的质量和尺寸影响应力波的波速,质量越大,尺寸越大,波速越小。而在节子总质量不变的条件下,节子数量越多,波速越小。造成此相关性的原因是节子解剖构造与清材不同,还是节子内部的化学物质含量不同,未见相关报道,但是节子的这一声学特性对于节子的检测起着重要的作用。

2.2　化学性质

由于节子部位的生长方式、连接方式和受力都不同于正常的木质部,节子部位的化学性质也与正

常树木的木质部不同。主要表现在三大素的分布、灰分含量、抽出物含量及成分。

朱莉等[17]对木红松的应力木进行研究，发现节子产生部位的应压木的木质素和纤维素含量都与正常材不同。有研究发现在应压木中瘤状物直径较对应木大 40～55 nm，因此节子产生部位的应压木的木质素和灰分含量高是否与木质素在应压木的沉积有关，还是其他化学物质含量有关有待进一步考察[18]。

通常情况下，所有树种节疤中的抽提物比心材中丰富，且针叶树材节疤抽提物整体上比阔叶树材丰富，Zineb Kebbi-Benkeder[19]对于几种针叶材的抽提物化学成分进行分析，得出针叶材节子在形成过程中，节子部位的抽提物增加且木质化程度增高。木材节子处的抽提物对于保护心材至少起到 3 种作用：第 1 杀菌作用、第 2 清除自由基即抗氧化作用、第 3 螯合作用。Suvi. P. Pietarinen 等[20]在对木脂素类物质与木质素生物合成相关关系的研究中认为针叶材在节子处所产生的抽提物是树木生长过程的必须物质，在木节形成之前，树枝被砍掉或者脱落使木质部暴露在空气中，这时木节处产生的如木质素类等抗氧化的物质可以防止在伤口愈合前受到感染，木节处的抽提物在节子形成过程中起到关键作用。

针叶材木节的抽提物主要是木质素类和芪类化合物，阔叶树材节疤抽提物含量亦高于心材，其酚类抽提物主要成分是黄酮类[21-22]。K. B. Zineb 等[19]对不易发生自然整枝的樱桃树（*Cerasus pseudocerasus*）、刺槐树（*Robinia pseudoacacia*）等树种的研究发现，这些树种节疤中有更高含量的黄酮类物质，而容易发生自然整枝的阔叶树种中几乎不含黄酮类物质。

虽然节子部位的抽提物含量高是节子在形成时产生的智能反应，是为了保护树木正常生长而存在。但是含有节子部位丰富的抽出物也会影响木材的使用。因抽出物酸碱性影响木材的整体酸碱性，导致含节子的木材抽出物含量高于普通木材，会在使用时造成影响。

3 力学性质

3.1 节子对力学性质的影响

节子不仅影响木材外观，同时也降低木材质量。随着木材在我国的使用量逐渐扩大，对材质要求也越来越高，做为木材缺陷中最普遍和最常见的一种缺陷，木材检验的主要对象之一就是节子。杉木木材的 5 种常见降等缺陷是节子、钝棱、漏刨、腐朽、斜纹理。其中节子是杉木落叶松等规格材 No. 1 等级的最主要降等缺陷，是 No. 2 等级的主要降等缺陷之一[23-25]。龚迎春[26]对杉木目测等级规格材足尺抗压和拉伸强度的设计值研究中得到结论 No. 1 等级规格材主要缺陷为节子，对力学性能影响较大；No. 2 等级规格材主要缺陷为节子和钝棱，但节子的数量相对较少，对强度的影响不大。刘松龄等[27]研究了杉木木节对受弯构件承载能力的影响，结果表明木节对于受弯构件的弹模影响不明显，对受弯构件的抗弯强度影响较大，木节相对尺寸的大小与抗弯强度成反比的结论。木节直径与试样高度的比值每增大 0.1，抗弯强度平均降低 6%。这是因为木节处的涡纹形纹理，在受拉区下缘的断开程度，对抗弯强度的影响较大。阙泽利等[28]对 SPF（云杉-松木-冷杉）规格材进行研究并报道：侧弯试件和平弯试件在密度相近的情况下，当跨中加载点有木节时，试件高度方向上木节直径比例愈大，静曲强度的降低愈明显。平弯试验中节子直径占高度方向的比例较高，试件弹性模量离散程度也愈大。

节子的存在不仅影响刀具的使用[29]，还严重影响木材力学性能，影响木结构的力学强度（抗弯、抗压强度）。在结构材中，节子对结构材的构件的连接区域、稳定承载能力、胶合木胶合及连接区域都有显著影响。GB 50005-2003《木结构设计规范》规定，齿板连接中规格材在连接区域不应有木节、裂纹和钝棱等缺陷。而丁星等[30]进行试验，选取的木节面积 482～2 016 mm^2 内，延性比比值的均值为0.993 4，变异系数为 0.133 5，木节对延性比均值总体上影响很小，但延性比比值的离散性较大。同时郭宇航等[31]的研究证明，节子对轴心受压胶合木柱稳定承载力有显著影响，在一定程度上降低轴心受压胶合木柱的稳定承载力。

3.2 对于含有节子的木材力学性能预测

节子是影响木材力学性能的重要因素之一，在木材力学性能测定时，无疵试件并不能代表木材实际使用时的力学性能，钟永[32]对具有木节的落叶松规格材的力学性能进行模型预测，得到结果落叶松规格材足尺抗弯弹性模量与密度、木节之间的关系为：$Ef = 6.82 - 5.80\sum[(Ik/Ig)\times(Mk/Mo)] + 9.17\rho 1.25.$；落叶松规格材足尺抗弯弹性模量、清材抗弯弹性模量和木节信息三者之间关系为：$Ef/Ec = 0.96 - 0.47\sum[(Ik/Ig)\times(Mk/Mo)]$。抗弯强度随着抗弯弹性模量的增加而增加，但是这种增加不一定是线性增加，主要原因是受到木材相关缺陷的影响[33]。T. H. Riberholl[34]建立了锯材的强度理论模型，证明木材的破坏主要起始于由木节或木节群所造成的弱强度区。钟永等[35]建立规格材足尺抗弯强度与木节信息之的关系模型和足尺抗弯强度

与清材抗弯强度、木节信息之间的关系模型,计算公式为:ff/fc=−0.66Ik/Ig+0.45。该公式可为不同尺寸规格材、胶合木等结构用木材抗弯强度受木节的影响分析提供参考。

4　节子检测方法

节子是影响木材使用的重要因素之一,节子的类型、尺寸、数量对板材的使用有不同的影响。板材上节子的类型主要与树干中节子分布与树干夹角和下锯时的方式有关[36],节子快速检测对于下锯、木材的合理使用有着重要的作用。德国在 20 世纪 90 年代就利用超声波技术得到木材的声波图像,利用图像分析检测木材缺陷。美国等发达国家研制了超声波木材检测仪,该方法需借助中间均匀介质(如水或油等)对木材缺陷进行检测。法国已研制出微波木材检测仪,但检测结果受到木材含水率影响较大,该方法的适用范围和精确度仍需提高。加拿大、澳大利亚等国家将 X 射线扫描技术应用到木材检测中,该方法对木材常见缺陷检测较为有效,但设备造价高而且需要精细的防护措施[37]。

在我国木材缺陷检测主要还是以人工检测为主,在生产过程中因劳动强度较大、个人检测经验和主观认知不同等因素,导致检测效率和准确率都较低,难以实现自动化要求。近年来,节子的检测方法受到国内学者的关注。以下是国内近年来对于节子的检测方法。

表 1　近年国内节子检测方法[38-47]

Table 1　Knot detection methods in recent years in China

序号	检测方法	年份	作者
1	视频检测数学描述法	2001	张建华
2	基于 CT 图像板材节子边缘检测法	2011	李广义
3	近红外光谱结合 SIMCA 模式识别法	2012	杨忠
4	基于图像分解的单板节子缺陷图像修补方法	2013	王阿川
5	运用 TRIZ 中矛盾解决理论分析与物质场分析,提出一种结合分水岭、区域生长以及边缘检测节子识别方法	2013	于慧伶
6	基于模糊聚类分析的新型木材声波无损检测方法	2015	郭瑞
7	应用灰度直方图特征识别木材表面节子缺陷	2015	宋小燕
8	基于局部二值拟合模型的板材表面节子与虫眼的图像分割	2016	白雪冰
9	种基于木材表面图像的灰度和纹理特征的木材节子缺陷检测与定位方法	2017	王泽润
10	基于近红外光谱技术的针叶材板材表面节子缺陷检测	2017	周竹

表 1 的方法主要针对锯材表面的节子检测,是基于节子在颜色上与正常木材的区别,通过图像分割、红外、SIMCA、灰度直方图等计算机方式识别板材表面的节子,识别率在 90%～99%。

在节子的无损检测中,由于原木的尺寸加大,显然检测难度也大,由于很多节子在木材内部,无法通过图像分割的方法检测。CT 检测技术是原木检测常用的方法,CT 检测技术又称 X 射线检测,基于木材中不同缺陷对于 X 射线的吸收和透过率不同,对射线吸收的数据进行分析和处理,得到被检查样品的立体图像,进而得到整段原木内部节子的分布和结构等信息。通过这些信息建立内部节子的模型,优化原木的锯切操作[48]。

为优化木材材性,减少节子在木材使用中产生的负面影响,检测活立木中节子的数量及分布的预测可以更好的帮助在树木生长过程中对木材进行改良。国内外学者根据节子特征、林木密度、树龄、树干特征等对节子进行预测,以期在树木生长过程中对树木进行合理的整枝,减少节子的数量,减小节子的尺寸。R. E. Thomas[49] 基于外部节子的特征来预测美国黄杨内部特征,并建立了美国黄杨原木的外部与内部缺陷特征的一系列定量化关系模型。模型预测结果误差很小,尤其是对尺寸预测误差较小。D. A. Maguire 等[50]提出视觉上估计活冠的高度这一方法,认为视觉估计活冠高度的方法与分枝死亡率测定技术(详细的茎解剖和分支死亡率测定后描述的衰退被认为是“实际的”衰退)的结果相吻合,而视觉上估计活冠的高度这一方法的误差源于视觉识别的主观性。贾炜玮等[2]以不同年龄,不同密度及不同立地条件的樟子松人工林为研究对象,对树干的解析、枝解析及节子剖析数据进行研究,利用树木胸径和枝下高对樟子松每个年轮节子平均直径的最大值和节子的位置进行预测。健全节长度利用线性混合模型来预测,而疏松节长度用自然划数混合模型来描述。郝建等[51]分析了在格木生长过程中的节子的发生、形成及分布特征,通过逐步回归分析,筛选出关键因子建立评判节子影响的多元回归模型方法。结果表明与地理方位相比,坡向是影响格木分枝分布的重要因素。节子分布最多的位置是树干高度 2.0～8.0 m,当分枝角度＜60°时。分枝形成节子的直径均＞2.5 cm,直径与死节的长度以及节子在木质部中的跨度成正比。格木分枝形成的高峰

期在第 1～15、16～25 年是分枝脱落及伤口愈合期，而格木形成死节最多的时间是第 11～20 年，这时段是控制死节形成的关键时期。郝建等人还通过逐步回归分析，筛选出分枝直径，分枝角度和分枝年龄 3 个关键因子，并建立了与节子发生点到愈合点距离的多元回归模型：yRT＝1.634 4xBD＋0.067 8xIA＋0.164 8xYB－1.611 4（F＝106.869 7，P＝0.000 1）。E. Duchateau 等[52]应用 CT 技术扫描了 10 株黑云杉 5 377 个节子，建立了节子占树干面积比例随年龄变化的预测模型，描述了节子生长发育状况，对活力木中节子具有良好的预测。

5 节子对于木材有关的其他终端产品的影响

木材除了用于建筑和部分土木工程中，家具、地板等装饰装修也大量使用木材，后者对于材料的力学性能要求低，但是要求其尺寸稳定、花纹美观，以及良好的胶合性能等。胶合面上节子的存在会降低木材的胶合性能，其中节子尺寸影响较显著，节子类型的影响不显著；随着两胶合面节子相对面积的增加，胶合性能降低。因此林兰英等[53]建议在集成材的生产过程中，去除直径 25 mm 以上的节子，或避免两胶合面上直径＞25 mm 的节子对接。由于节子部位的抽出物较多，节子部位的抽出物酸碱性不同于木材其他部位的酸碱性造成木材在胶合过程中影响胶黏剂的固化，从而造成胶合效果差。常见的家具用材，如家具装饰用集成材是由剔除木材缺陷（节子、树脂、腐朽等）的短小木方指接成一定长度后，再横向拼宽（或拼厚）胶合而成的木质材料。现在越来越多的家具开始遵循木材自然特征，保留甚至追求木材缺陷所构成的美观。例如很多高档家具，需要的鸟眼花纹是由节子实现的。

木材在日常生活中应用广泛，木节的存在也会对日用品的使用造成影响，以乐器为例，起到共鸣板作用的木材要求木材不能有开裂、节子虫眼等缺陷[54]。但是有些乐器如电吉它的发音是通过弦码下的电磁扩音装置连接音箱（扬声器）而实现的，对于材质就没有如此严格的要求，反而要求有美丽的花纹外观，节子的纹理可以满足此要求。

6 结论

在树木生长过程中节子是枝条与树干之间最佳连接方式，无论在外力作用还是外部细菌等因素的影响下，节子在树木生长过程中所体现的物理性能和化学性能都有着良好的作用。但是在木材的利用中，节子对于木材力学性能和加工性能的影响巨大，不仅对于刀具损伤较大，在一定程度上降低木材的抗拉、抗压、抗弯性能，同时对于木结构连接部位的力学性能也有一定影响。目前国内外对于板材节子检测的研究较充分，但是对于原木的节子检测研究较少。在有节材力学性能预测方向，得到了较为精准的模型对力学性能进行预测。通过节子特征、林木密度、树龄、树干特征等对节子进行预测，帮助在树木生长过程中对木材进行改良。

目前有关节子的研究主要集中在有节材力学性能和检测等方向，对于节子部位的超微观构造和构造智能性利用等方面相对薄弱，对于节子如何影响木材力学性能的机理并未深入。建议今后的研究方向从以下几个方面进行：1）探究不同树种与节子数量的关系，旨在通过基因调控，对不同用途的木材进行节子数量和节子大小进行调控。2）深入研究节子数量与尺寸如何影响力学性质，以及二者的交互作用。3）深入研究节子微观构造及超微观构造，建立节子的解剖构造立体化模型，开发仿生学的研究，揭示构造智能化的成因。4）展开节子美学研究。节子是树木在脱掉枝丫后得到的一双眼睛，记录着树木在生长过程中经历的历程，是大自然赋予树木的礼物，开展节子美学研究是对有节材的利用的新方向。

参考文献：

[1] ULRICH M，GINDL W，Jeronimidis G. Biomechanics of a branch-stem junction in softwood[J]. Trees (Berlin)，2006，20(5)：643-648.

[2] 贾炜玮. 樟子松人工林枝条生长及节子大小预测模型的研究[D]. 哈尔滨：东北林业大学，2006.

[3] HEIN S. Knot attributes and occlusion of naturally pruned branches of *Fagus sylvatica*[J]. Forest Ecology & Management，2008，256(12)：0-2057.

[4] 刘一星，赵广杰. 木质资源材料学[M]. 北京：中国林业出版社，2004.

[5] SHIGO A L. How tree branches are attached to trunks[J]. Revue Canadienne De Botanique，1985，63(8)：1391-1401.

[6] TIMELL T E. Helical thickenings and helical cavities in normal and compression woods of *Taxus baccata*[J]. Wood Science & Technology，1978，12(1)：1-15.

[7] LEMIEUX H，BEAUDOIN M，ZHANG S Y. Characterization and modeling of knots in black spruce (*Picea mariana*) logs[J]. Wood and Fiber Science，2001. 33(3)：465-475.

[8] 陈东升，金钟跃，李凤日，等. 樟子松节子的大小及分布[J]. 东北林业大学学报，2007，35(5)：19-21.
CHEN D S，JIN Z Y，LI R F，*et al*. Knot size and distribution of mongolian pine plantations[J]. Journal of Northeast Forestry University，2007，35(5)：19-21. (in Chinese)

[9] OSBORNE N L，MAGUIRE D A. Modeling knot geometry from branch angles in *Douglas-fir* (/r，*Pseudotsuga menziesii*/r，)[J]. Canadian Journal of Forest Research，2016，46

(2):215-224.

[10] TRINCADO G,BURKHART H E. Model of knot shape and volume in loblolly pine trees[J]. Wood & Fiberence,2008,40(4):634-646.

[11] 雍朝柱,李云莲. 杉枝材的物理力学性质及利用[J]. 贵州林业科技,1991,19(4):69-70.
YONG CH Z,LI Y L. Physical and mechanical properties and applications of fir branches[J]. Guizhou Province Forestry Science and Technology,1991,19(4):69-70. (in Chinese)

[12] 王玉荣,赵荣军,江泽慧,等. 火炬松树干、节疤及枝条木材的密度分析研究[J]. 林产工业,2016,43(11):14-17.
WANG Y R,ZHAO R J,JIANG Z H,*et al*. Density analysis of stem, knot and branch of *Pinus taeda* [J]. China Forest Products Industry,2016,43(11):14-17. (in Chinese)

[13] 周永东,孙锋,吕建雄,等. 6 种桉木单板干燥质量的比较[J]. 林业科学,2014,50(11):104-108.
ZHOU Y D,SUN F,LV J X,*et al*.. Veneer drying quality comparison of six *Eucalyptus* species[J]. Scientia Silvae Sinicaf,2014,50(11):104-108. (in Chinese)

[14] GERHARDS C C. Longitudinal stress waves for lumber stress grading: factors affecting applications: state of the art [J]. For Prod J,1982,32(2):20-25.

[15] 林文树,杨慧敏,王立海. 超声波与应力波在木材内部缺陷检测中的对比研究[J]. 林业科技,2005,30(2):39-41.
LIN W S,YANG H M,WANG L H. Comparative study on ultrasonic and stress wave for nondestructive test of wood defects[J]. Forestry Science & Technology,2005,30(2):39-41. (in Chinese)

[16] 王亚磊,赵茂程,王正. 木材动态弹性模量测量中节子对于应力波传播的影响[J]. 西北林学院学报,2014,29(3):183-187.
WANG Y L,ZHAO M S,WANG Z. Influence of wood knots on the stress wave propagation in the dynamic measurement of elastic modulus[J]. Journal of Northwest Forestry University,2014,29(3):183-187. (in Chinese)

[17] 朱莉,石江涛. 红松应力木木材形成组织的化学组成特征分析[J]. 植物研究,2012,32(2):232-236.
ZHU L,SHI J T. Chemical compound characteristic analysisi of wood forming tissue from reaction wood of *Pinus koraiensis*[J]. Bulletin of Botanical Research,2012,32(2):232-236 (in Chinese)

[18] 姜笑梅,殷亚方,刘晓丽,等. IAWA 针叶树材显微特征一览表(续二)[J]. 木材工业,2004(6):41-42.

[19] ZINEB K B,FRANCIS C,STEPHANE DU,*et al*. Quantification and characterization of knotwood extractives of 12 European softwood and hardwood species[J]. Annals of Forest Science,2015,72(2):277-284.

[20] SUVI P. P,STEFAN M. WILLFOR M O. Ahotupa *et al*. Knotwood and bark extracts:strong antioxidants from waste materials [J]. Journal of Wood Science,2006,52(5):436-444.

[21] WILLFOR S M,AHOTUPA M O,HEMMING J E,*et al*. Antioxidant activity of knotwood extractives and phenolic compounds of selected tree species[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2003,51(26):7600-7606.

[22] HOLMBOM B,ECKERMAN C,EKLUND P,*et al*. Knots in trees——a new rich source of lignans[J]. Phytochemistry Reviews,2004,3(3):331-340.

[23] 郭伟,任海青,殷亚方,等. 北美规格材目测分等概述[J]. 世界林业研究,2007,20(5):57-62.
GUO W,REN H Q,YIN Y F,*et al*. Summary of visual grading on structure lumber in North America[J]. World Forestry Research,2007,20(5):57-62(in Chinese)

[24] 娄万里,任海青,江京辉,等. 落叶松规格材目测分等的研究[J]. 木材工业,2010,24(2):1-4.
LOU W L,REN H Q,JIANG J H,*et al*. Effcets of major defects on dimensional larch lumber visual grading[J]. China Wood Industry,2010,24(2):1-4. (in Chinese)

[25] 郭伟,任海青,殷亚方. 杉木目测分等规格材缺陷类型及分布的研究[J]. 建筑材料学报,2009,12(4):462-465.
GUO W,REN H Q,YIN Y F. Study on types and distribution of visual characteristics about chinese fir dimension lumbers[J]. Journal of Building Materials,2009,12(4):462-465. (in Chinese)

[26] 龚迎春,王朝辉,江京辉,等. 杉木目测等级规格材足尺抗压和拉伸强度的设计值研究[J]. 林业工程学报,2017,2(2):22-27.
GONG Y C,WANG Z H,REN H Q,*et al*. Design values of compressive and tensile strength for visually graded Chinese fir dimension lumber[J]. Journal of Forestry Engineering,2017,2(2):22-27. (in Chinese)

[27] 刘松龄,方文彬,李飞云. 杉木木节对受弯构件承载能力影响的研究[J]. 中南林学院学报,1981(1):22-38.

[28] 阙泽利,李哲瑞,冒海燕,等. SPF 规格材密度与节子变异特性对抗弯性能的影响[J]. 林产工业,2016(3):16-18.
QUE Z L,LI Z R,MAO H Y,*et al*. The influence of bending performance by the variations in wood density and knot of SPF dimension lumber[J]. China Forestry Products Industry,2016,(3):16-18. (in Chinese)

[29] 高炳天,权富成. 节子木材成形铣刀的研究[J]. 中国科技博览,2009,21(5):274-276.
GAO B T,QUAN F C. Study on wood knot cutter[J]. China Science and Technology Expo.,2009,21(5):274-276. (in Chinese)

[30] 丁星,张新培. 木节对齿板连接剪切延性统计特性的影响[J]. 林产工业,2016,43(12):21-25.
DING X,ZHANG X P. The effect of knot on statistical characteristics of shear ductility of truss-plate-connected joints[J]. China Forestry Products Industry,2016,43(12):21-25. (in Chinese)

[31] 郭宇航,周淑容,崔佳,等. 木节对轴心受压胶合木柱稳定承载力的影响[J]. 土木建筑与环境工程,2017,39(3):44-49.
GUO Y H,ZHOU S R,CUI J,*et al*. Effect of knot on stability of glulam column under axial compressive loading[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering. 2017,39(3):44-49. (in Chinese)

[32] 钟永,孙华林,娄万里,等. 木节对落叶松规格材抗弯弹性模量的影响[J]. 建筑材料学报,2012,15(4):518-521.
ZHONG Y,SUN H L,LOU W L,*et al*. Effect of knot on bending modulus of elasticity of larch dimension lumber[J]. Journal of Building Materials 2012,15(4):518-521. (in Chinese)

[33] SCHAJER G S. Lumber strength grading using *x*-ray scanning[J]. Forest Products Journal,2001.

[34] RIBERHOLTT H,MADSEN P H. Strength of timber structures,measured variation of the cross sectional strength of

structural lumber(Report R 114)[R]. Struct Research Lab., Technical University of Denmark,1979.

[35] 钟永,任海青,娄万里. 木节对规格材抗弯强度影响的试验研究[J]. 建筑材料学报,2012,15(6):875-878.
ZHONG Y,,REN H Q,LOU W L. Experimental research on the effects of knot on the bending strength of dimension lumber[J]. Journal of Building Materials,2012,15(6):875-878. (in Chinese)

[36] 郭伟,任海青,骆秀琴,等. 杉木规格材节子类型形成原因的研究[C]. 中国科协年会,2007.

[37] 王林. 基于 Gabor 变换的木材表面缺陷识别方法的研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2010.

[38] 张建华,张瑞滨,任洪娥,等. 板材节子视频检测数学描述理论[J]. 东北林业大学学报,2001,29(1):74-75.
ZHANG J H,ZHANG R B,REN H E,*et al*. 2001. The research of panel node video identify theory[J]. Journal of Northeast Forestrt University,2001,29(1):74-75. (in Chinese)

[39] 李广义,邱白晶,解金键. 基于 CT 图像板材节子边缘检测的研究[J]. 安徽农业科学,2011,39(24):15168-15169.
LI G Y,QIU B J,XIE J J. Research on panel knot edge detection based on CT images[J]. Journal of Anhui Agri. Sci.,2011,39(24):15168-15169. (in Chinese)

[40] 杨忠,陈玲,付跃进,等. 近红外光谱结合 SIMCA 模式识别法检测木材表面节子[J]. 东北林业大学学报,2012,40(8):70-72.
YANG Z,CHEN L,FU Y J,*et al*. Rapid detection of knot defect in wood surface by near infrared spectroscopy coupled with simca pattern recognition[J]. Journal of Northeast Forestrt University,2012,40(8):70-72. (in Chinese)

[41] 王阿川,侯畅,宋宏光,等. 基于图像分解的单板节子缺陷图像修补方法研究[J]. 林业机械与木工设备,2013(8):50-54.
WANG A C,HOU C,CHEN H G,*et al*. Study on method for repairing veneer knot defect images based on image decomposition[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment,2013(8):50-54. (in Chinese)

[42] 于慧伶,梁浩,郭洁,等. 基于矛盾解决理论与物质——场分析的实木地板节子识别新方法研究[J]. 林业科技,2013,38(6):32-36.
YU H L,LIANG H,GUO J,*et al*. A new method for solid wood floor knot recognition based on contradiction solution theory and substance-field analysis[J]. Forestry Science & Technology,2013,38(6):32-36. (in Chinese)

[43] 郭瑞,马肖祥,邢涛,等. 模糊聚类分析在色木孔洞缺陷位置声波检测中的应用[J]. 西北林学院学报,2015,30(4):251-256.
GUO R,MA X X,XING T,*et al*. Application of fuzzy cl uster analysis on diagnosing the hole defects in acer mono wood using acoustic testing [J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(4):251-256. (in Chinese)

[44] 宋小燕,白福忠,武建新,等. 应用灰度直方图特征识别木材表面节子缺陷[J]. 激光与光电子学进展,2015,52(3):199-204.
SONG X Y,BAI F Z,WU J X,*et al*. Wood knot defects recognition with gray-scale histogram features[J]. Laser & Optoelectronics Progress,2015,52(3):199-204. (in Chinese)

[45] 白雪冰,许景涛,郭景秋,等. 基于局部二值拟合模型的板材表面节子与虫眼的图像分割[J]. 浙江农林大学学报,2016,33(2):306-314.
BAI X B,XU J T,GUO J Q,*et al*. Segmentation of wood surface knots and wormholes based on an improved LBF model [J]. Journal of Zhejiang A&F University,2016,33(2):306-314. (in Chinese)

[46] 王泽润,方益明,冯海林,等. 木材节子缺陷检测与定位方法[J]. 激光与光电子学进展,2018,55(5):317-324.
WANG R Z,FANG Y M,FENG H L,*et al*. Method for wooden knot detection and localization[J]. Laser & Optoelectronics Progress,2018,55(5):317-324. (in Chinese)

[47] 周竹,尹建新,周素茵,等. 基于近红外光谱技术的针叶材板材表面节子缺陷检测[J]. 浙江农林大学学报,2017,34(3):520-527.
ZHOU Z,YIN J X,ZHOU S Y,*et al*. Knot detection on coniferous wood surfaces based on near infrared spectroscopy[J]. Journal of Zhejiang A&F University,2017,34(3):520-527. (in Chinese)

[48] 黄素涌,王建和,吕建雄,等. 世界节子研究进展[J]. 林产工业,2011,38(5):3-7.
HUANG S Y,WANG J H,LV J X,*et al*. Review of overall research on knots[J]. China Forest Products Industry,2011,38(5):3-7. (in Chinese)

[49] THOMAS R E. Predicting internal yellow-poplar log defect features using surface indicators[J]. Journal of the Society of Wood Science & Technology,2008,40(1):14-22.

[50] MAGUIRE D A,HANN D W. A sampling strategy for estimating past crown recession on temporary growth plots[J]. Forest Science,1990,36(3):549-563.

[51] 郝建,蒙明君,黄德卫,等. 格木人工林节子的分布特征及预测模型[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2017,41(3):100-104.
HAO J,MENG M J,HUANG D W,*et al*. Distribution and statistical analysis of knots in *Erythrophleum fordii* plantations[J]. Journal of Nanjing Forestry University:Natural Science Edition,2017,41(3):100-104. (in Chinese)

[52] DUCHATEAU E,AUTY D,MOTHE F,*et al*. Models of knot and stem development in black spruce trees indicate a shift in allocation priority to branches when growth is limited [J]. Peerj,2015,3(4):873.

[53] 林兰英,何盛,傅峰. 节子对木材胶合性能的影响[J]. 木材工业,2012,26(4):12-15.
LIN LY,HE S,FU F. Effect of knot size and types on glulam bonding performance[J]. China Wood Industry,2012,26(4):12-15. (in Chinese)

[54] 刘镇波,刘一星,沈隽,等. 乐器共鸣板用木材的声学特性研究进展[J]. 西北林学院学报,2006,21(3):124-129.
LIU Z B,LIU Y X,SHEN J,*et al*. Advances in study and research on acoustic property of wood for soundboard of musical instrument[J]. Journal Northwest Forestry University,2006,21(3):124-129. (in Chinese)