

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2020101

钢琴制造对木质材料及生产加工的要求

陈振兴¹, 周永东², 周凡², 付宗营², 高鑫²

(1. 特兰斯派(烟台)木业有限公司, 山东蓬莱 265600; 2. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)



摘要: 以构成钢琴的5个最主要的基本部分(弦列、音板、支架、键盘机械和外壳)为出发点, 从树种、材质、尺寸规格、声学特性等方面概述对木质材料的要求, 从原木锯解、琴材干燥和精加工装备等角度总结钢琴制造对生产加工过程的要求。分析现阶段我国钢琴制造业存在的主要问题, 提出相应的发展建议, 以期为国内钢琴制造业高品质发展提供参考。

关键词: 钢琴制造; 木质材料; 生产加工; 发展建议

中图分类号: S781.38; TS62

文献标识码: A

文章编号: 2096-9694 (2021) 03-0006-06

Requirements for Wood Materials and Production Process in Piano Manufacturing

CHEN Zhen-xing¹, ZHOU Yong-dong², ZHOU Fan², FU Zong-ying², GAO Xin²

(1. Trans-pac (Yantai) Timber Co., Ltd., Penglai 265600, Shandong, China;

2. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: The requirements for the five most important parts of pianos (string, soundboard, bracket, keyboard and shell) made by wooden materials were summarized in terms of species, material quality, dimensions, acoustic characteristics. The production procedures of the wooden parts were also introduced according to the requirements of the piano manufacturing, including sawing, wood drying and equipment installation. The main issues and challenges of the piano manufacturing industry of China were analyzed, and the corresponding development suggestions were proposed. This paper provides a reference for the high-quality development of the domestic piano manufacturing industry.

Key words: piano manufacture; wood materials; production and processing; development proposals

随着经济的发展和物质生活水平的提高, 人们的精神文化需求迅速增长, 乐器作为一类高雅的娱乐器具, 市场需求不断增长, 促进了乐器工业的快速发展, 目前中国已经成为全球最大的乐器制造与出口国^[1-2]。钢琴作为结构最为复杂、生产加工技术含量最高的乐器, 一直被视作乐器工业水平标志。目前中国钢琴产量已达到全球产量

的75%以上, 是名副其实的钢琴制造大国, 但是国产钢琴的品质与德国、日本等传统乐器制造强国的优质钢琴相比仍存在差距^[3-4]。

现代钢琴由近9 000个零件构成, 制造这些零件所用的原材料种类繁多, 在各种材料中, 木质材料用量占比最大, 这也是将钢琴制造列入木材工业的原因之一^[5]。木质材料具有优良的声学特性, 但其作为生物材料也具有天然缺点, 如非均质、尺寸不稳定、生长应力、纹理偏斜等, 因此钢琴制造对木质材料的选料、干燥、加工、装

收稿日期: 2020-07-13; 修改日期: 2020-08-24

作者简介: 陈振兴(1982—), 男, 副总经理。Email: zxchen3040257@foxmail.com

通讯作者: 高鑫, 男, 助理研究员。Email: gaoxin@caf.ac.cn

配都有较高的要求^[6]。笔者基于长期就职于国内主流钢琴制造企业的经验, 总结钢琴制造对木质材料及生产加工技术的要求, 结合行业现状分析国内钢琴制造业发展中存在的问题, 并提出相应的建议, 供行业相关人员探讨交流。

1 钢琴制造对木质材料及加工技术的要求

1.1 钢琴主要分类与结构

现代钢琴一般按照音板平面与放置地面间的关系分为两类: 音板与地面平行的称为卧式钢琴, 音板与地面垂直的称为立式钢琴。由于卧式钢琴外观一般大致呈三角形, 也习惯称为三角钢琴^[7]。

尽管钢琴外观与尺寸规格存在差异, 但都由5个基本部分组成, 包括: 弦列、音板、支架、键盘机械、外壳。不同类型的钢琴基本部分的形状、材质、规格有所差异, 但作用都是相同的^[5]。弦列是用特制的钢丝以一定张紧力固定在支架上, 用以在钢琴弹奏过程中产生振动, 弦的振动频率和钢琴键盘按键的音名相符。音板由大片薄板构成, 弦的振动迫使音板同步振动, 由于音板接触面积很大, 可使周围大量空气发生波动, 作用类似于声音放大器。支架主要用来固定弦列和音板, 一台钢琴通常有两个支架, 金属支架和木制支架, 分别用以固定弦列和音板, 两个支架也起到相互稳固的作用。键盘主要用于演奏者激发弦列的振动, 外壳则有三方面作用: 保护、美观及共鸣器。

1.2 钢琴制造对木质材料的要求

除弦列外, 钢琴基本部分大量使用木质材料。由于钢琴发源于欧洲, 最初的钢琴制造多就地取材, 采用当地常见树种木材, 如音板、肋木、键盘采用欧洲云杉 (*Picea abies*), 弦马采用欧洲水青冈木 (*Fagus sylvatica*, 又名欧洲山毛榉)。随着钢琴制造产业在全球的发展, 北美、亚洲又选用当地相近性能的树种, 如西藏云杉 (*Picea spinulosa*)、西加云杉 (*Picea sitchensis*)、北美糖槭 (*Acer saccharum*) 作为原料。由于钢琴零件数量多, 结构复杂, 其生产制造可称得上一项系统工程, 因此在确定了树种、零件尺寸规格、声学特性、力学指标等参数后, 经典型号的钢琴一般不再轻易进行改动 (特别是音板、键盘等部位),

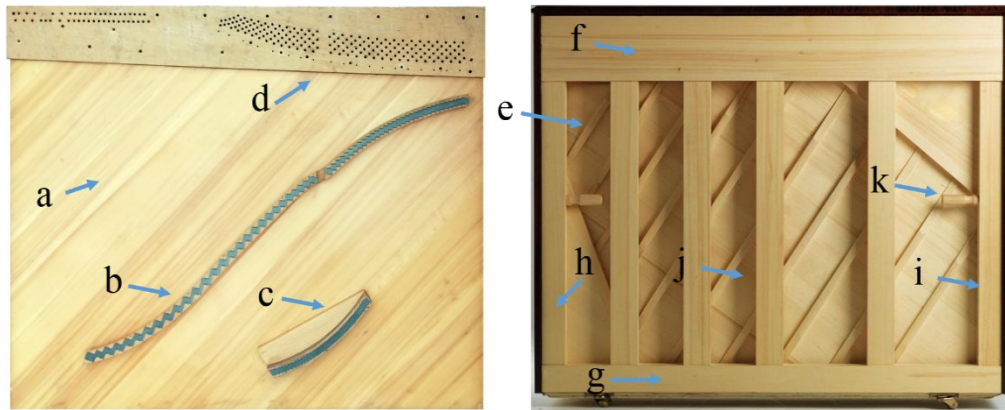
后续多在钢琴外壳的材质、油漆、装饰等方面加以改进, 以提高美观度^[8]。虽然目前国内钢琴制造产能较大, 但在产品设计、制造技术等方面, 与传统乐器制造强国之间仍存在一定差距, 在材料选择上多借鉴一些经典型号进口钢琴^[9-10]。

1) 音板

如图1所示, 音板主要由3部分构成: 共振板、弦马和肋木。共振板是音板的基础, 由多块不同尺寸的板条拼接而成。主要作用是产生声音的共振和放大, 多采用声学性能较好的针叶树材, 以云杉 (*Picea spp.*) 为主, 著名品牌的钢琴甚至需要指定产地的云杉。由于木材径向具有较大的弹性, 共振板均采用径切板, 厚度8~11 mm。为了保证演奏声音纯净, 音色优美, 共振板需无节子、腐朽、偏宽年轮、斜纹理等。品质较高的钢琴还需限定生长轮宽度与晚材率, 一般生长轮宽度1~4 mm, 且晚材率不宜超过30%。

钢琴对于声学性能的要求主要集中在音板制造过程, 为了保证音板具有较好的声音表现, 在加工音板过程中对共振板挑选、搭配有严格要求, 每家企业都将其视为核心技术严格保密。行业内常见共振板搭配方法主要包括3种: 按照年轮宽度搭配、按照音高搭配和按照声学常数搭配。其中按照声学常数搭配的方式应该是最为客观和科学的, 目前行业中一般采用弹性模量与密度间的声学常数 ($\sqrt{E/\rho^3}$) 作为判定标准, 一般用于共振板的木材声学常数不少于1 000, 并采用声学常数较为接近的共振板进行搭配组合^[11-13]。

弦马的作用是将弦的振动传播给共振板, 由于受到弦极大的张紧力, 弦马需用阔叶树材制作, 常用山毛榉 (*Fagus spp.*) 和槭木 (*Acer spp.*)。弦马带有一定弧度, 主要有两种加工方式, 锯制和单板弯曲压制。一般认为弯曲压制的效果更好, 材料利用率也更高。肋木与共振板长度方向相互垂直, 主要有两个作用, 加强共振板的强度, 同时把声波传向音板的全部面积区域 (垂直于共振板方向)。肋木一般也用云杉径切材加工, 截面尺寸常见25~35 mm×25~35 mm, 一台钢琴具有9~17条。肋木之间的距离间隔为90~140 mm, 高音部分肋木分布较为密集, 低音部位较为疏松^[14]。



a 共振板;b 高音弦马;c 低音弦马;d 弦轴板;e 肋木;f 上梁;g 下梁;h,i 两侧背柱;j 中间背柱;k 搬运把手。

图1 钢琴音板及木质支架

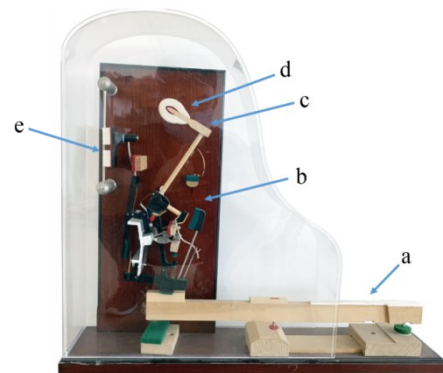
Fig.1 Piano sound board and wooden frame

2)木质支架

钢琴的木质支架习惯称为背架，用于固定音板，要求结构坚固稳定，制造和装配简便。立式钢琴和三角钢琴的木质支架在形状上有显著区别，但部件的名称和作用相似。以常见的立式钢琴为例，其主要包含上、下梁，两侧背柱，中间背柱，搬运把手等。上梁和背柱主要由云杉制成，为了保证尺寸稳定性，一般采用3层锯材胶合结构。下梁和音板框架主要采用山毛榉或槭木加工。

3)键盘机械

键盘机械是钢琴中结构最复杂的部分，一般由4个基本构件组合成杠杆机构，主要包括琴键、联动杠杆、小槌和辅助制音杠杆（达到消音、制音的效果）；钢琴制造行业中习惯将键盘机械中除琴键的部位称作击弦机，如图2所示。当琴键受到外力时，其运动传到联动杠杆，联动杠杆推动小槌，随机小槌产生击弦动作，使得琴弦发生振动。在琴键受到外力弹奏的同时，制音杠杆与琴弦分离，在击弦动作完成后，制音杠杆又压在弦上，使弦停止振动，防止“拖音”的出现。琴键一般要求强度高、比重小，多采用云杉、赤杨（*Alnus japonica*）、椴木（*Tilia spp.*）等制作，白键宽24 mm，黑键宽11 mm，键与键之间的距离（缝隙）范围在1.0~1.5 mm。琴键的尺寸稳定性要求较高，如果琴键在使用过程中发生较大变形，极易相互碰撞。联动杠杆部分对于木材强度、弹性、尺寸稳定性都有较高的要求，一般采用鹅耳枥（*Carpinus spp.*）制作。小槌则多用槭木、山毛榉等^[5,15]。



a 琴键;b 联动杠杆;c 小槌;d 羊毛毡;e 制音杠杆。

图2 键盘机械结构

Fig.2 The structure of keyboards

4)外壳

传统钢琴制造中外壳常用木材主要包括云杉、桦木和赤杨，但随着资源与工艺改变，目前除高档钢琴、定制钢琴外，消费级型号钢琴外壳大量使用纤维板、胶合板类木质材料，然后在外层贴定制薄木，再进行涂饰^[16]。由于钢琴一般采用亮面漆，光泽度高，所以对薄木的要求很高，不可存在裂隙，一般采用刨切的方式生产。

1.3 钢琴制造对原木锯解的要求

表1列举了钢琴制造所用的主要树种和用量，虽然钢琴成品的木材材积仅0.2~0.5 m³，但换算为原木材积则需要1.0~3.0 m³，演奏会级别钢琴的木材用量更多^[5]。其主要原因是钢琴对木材的材质、纹理、缺陷等有极高的要求，例如音板均采用标准径切板，不可有节疤、腐朽、虫蛀、偏斜纹理等，键盘材料需要标准径弦向材料，对缺陷也有

严格限制，导致出材率很低，对原木锯解装备和技术要求很高。以用量最大的云杉为例，因为音板材料的附加值最高，所以要求原木锯解时多生产标准径切板。生产中习惯先锯出原木中部含有髓心的径切板，再以剩下的两部分原木锯解出径切板，最后将4块扇形原木分别锯解。从这些径切板中优先挑选可用于音板的材料，剩余部分再用于键盘、支架的制作。

表1 钢琴制造的木材用量和主要树种

Tab.1 The volume of timber and main species used in piano manufacturing

钢琴种类	木材用量/m ³	主要树种及用量占比
标准立式	1.0~2.0	云杉 50% 桦木、赤杨 30% 山毛榉 13% 鹅耳枥 5% 槭木等 2%
书房卧式	1.5~2.5	
客厅卧式	2.0~3.0	
演奏会卧式	2.5~3.5	

注：数据来源于参考文献5及企业实际生产统计；木材用量换算为原木材积。

1.4 钢琴制造对木材干燥的要求

钢琴是对尺寸稳定性要求最高的木制品之一，例如键盘琴键之间的距离约1 mm，按照行业检测方法，经干湿循环试验后琴键之间的距离变形量应控制在0.01~0.02 mm，因此对木材干燥质量要求很高。

国内企业进行木材干燥生产时大多仿照国外的干燥方法，首先进行大气干燥，气干时间一般持续3~6月，至锯材含水率15%~20%；再进行约7 d的常规窑干，使锯材含水率控制在6%~8%。干燥后的锯材要求厚度上含水率分布均匀，无残余应力。消费级别的钢琴外壳一般采用胶合板、纤维板，不需要厂家再进行干燥，但需要采购质量优良、含水率要求合格的产品。

1.5 钢琴制造对精加工装备的要求

如前所述，钢琴制造业一般归为木材工业，钢琴大部分零部件的生产可以采用一般木材加工企业的通用精加工装备，但音板制造则需要品质较好的精加工装备或者专门定制的装备。如共振板加工时，为保证云杉表面光洁，纹理清晰，便于后续拼接音板过程挑选纹理与胶合，一般采用性能可靠的进口木工刨床或定制装备完成，尺寸加工精度通常要求高于0.2 mm。一些品质要求更高的钢琴产品，加工精度要求达0.1 mm以上，对

于加工装备刀轴、机身的稳定性都有较高的要求。此外，钢琴制造过程中对木材缺陷识别及自动化生产设备的需求越来越强烈。以往缺陷识别普遍依靠人工挑选，对于纹理、年轮宽度等缺陷的判断具有一定主观性，并且只能识别木材外观缺陷，无法判断内部缺陷。随着加工装备的技术进步，目前生产中已经应用了缺陷自动识别筛分设备，并且带有X射线探头，可实现木材内、外缺陷的同步检测，检测效率可达100 m/min，自动化程度进一步提高^[17]。

2 我国钢琴制造业发展中存在的问题及建议

2.1 存在的问题

1) 木材总体供应量较大，但高端钢琴用材日趋减少。

国内钢琴制造用木材多数为进口材，相较于其他木业产业，钢琴制造业的规模较小，行业发展所需的原材料目前供大于求，且能够满足行业的发展。但随着大径级原木供应量日趋减少，高端钢琴的价格将不断提高。

2) 钢琴生产加工技术及加工装备落后于欧美、日本等发达国家，自动化水平低。

国内钢琴制造业与国内其他木材加工业相似，在加工技术、装备等方面与发达林业国家仍存在一定差距^[18]。原木开料锯、刨床等关键设备，加工企业仍然需要使用国外品牌设备。在一些非主要工段，为节省成本选用一些较为便宜的设备，但自动化程度低，仍需要投入大量劳动力。

3) 钢琴总产量高，中、高端产品占比低，产品品质有待提高。

中国钢琴产量已占据全球产量的75%以上，仅珠江钢琴的产量就达30%左右，在数量上绝对领先于德国、日本、奥地利等传统钢琴制造强国。但是从主要产品结构与市场占有率可以看出，国产钢琴主要面向入门级和中档消费市场，高档产品几乎由国外著名品牌垄断。即使是入门级和中档产品，国产品牌钢琴相较于雅马哈（YAMAHA）、卡哇伊（KAWAI）等国外品牌相同档次产品的售价仍然低20%~40%，因此产品品质和定位有待提高^[19]。

4) 研发、设计投入少, 相关领域专家及科研人员数量较少。

国内钢琴企业研发投入少, 一方面是产品结构仍以入门级和中档产品为主, 与国外知名品牌同档次的产品售价相比更为便宜, 产品利润率低, 企业可用于研发、设计的资金投入相对较少。另一方面国内钢琴制造领域相关专家及科研人员数量较少, 钢琴制造又属于综合性产业, 涉及木材学、声学、材料力学、木材加工、金属加工、机械制造多个学科的专业知识, 企业遇到难题时很难及时解决。20世纪80年代, 国内曾通过积极引进国外专家与先进技术, 提高了行业整体水平。但随着国产钢琴在全球市场占有率的飞速增长, 国外钢琴业已经将中国企业视为最大的竞争对手而实行技术保密^[20]。

5) 专业技术人员及技术工人严重匮乏。

如前所述, 钢琴制造业对于技术工人的要求是木材工业中最高的, 其综合素质水平直接决定了最终产品的品质。国外钢琴制造已经有超过300年的历史, 具有深厚的技术沉淀, 积累了大量的生产经验, 技术工人业务技能传承有序, 而国内钢琴制造仅有50多年的历史。20世纪80年代经过国外专业培训的技术工人也已经到达退休年龄逐渐退出行业, “钢琴师”和技术工人严重匮乏。

2.2 发展建议

1) 进一步加强全球乐器用木材资源开发, 通过多种合作模式扩充原材料储备。

由于钢琴制造用木材主要为进口材, 木材的质量直接决定钢琴的品质, 企业应该加强全球范围内木材资源的开拓与整合, 可以通过承包与租赁林场、并购林权、可循环采伐、入股合营等多种合作模式, 确保钢琴制造的原材料长期可持续性供给。

2) 引进更为先进的生产加工技术与装备。

钢琴制造过程对于生产加工技术与装备有较高的要求, 对木材缺陷有严格的限制, 国内企业生产仍主要采用人工方式筛选缺陷, 成本高、效率低, 且难以检测木材内部的缺陷。目前先进的加工装备已经完全实现从原木锯解到备料工序的木材缺陷评级、筛选及智能加工, 极大地提升了

原料利用率和质量稳定性, 生产中应该大力引入相关智能生产技术与装备。

3) 进一步增加研发投入, 提升产品质量、档次与品牌知名度。

产品的品质永远是企业最强的竞争力, 也是消费者选择产品的首要因素。国内企业今后应增加研发投入, 冲击中、高端钢琴市场。在提升产品品质同时, 与著名音乐家合作, 支持音乐会、演奏会, 提升品牌知名度。

4) 加强产学研合作交流, 建立现代化的研发实验室与检测中心。

钢琴企业自身的科研能力、专业知识有限, 应加强与高校、科研院所的合作交流, 科研人员应该从专业的角度聚焦企业的实际问题, 并以企业目标为导向进行攻关。针对国内企业极少具备实验室与检测中心的情况, 可以依托高校及科研院所建立联合实验室与检测中心, 为增强科研能力、提升产品质量奠定基础。

5) 注重专业技术人员及技术工人的培养, 促进企业技术进步。

努力抓住机会聘请国外著名钢琴品牌的“钢琴师”或者经验丰富的技术人员, 并由此培养企业自己的专业技术人员, 重视技术学习并定期整理技术资料。企业应尽量提高专业技术人员与技术工人的福利待遇, 可以在内部设定技术等级, 完善人力资源储备体系和激励机制, 提升人才价值, 促进企业技术进步。

3 结语

随着社会物质生活水平的提高, 人们对精神生活也有了更高追求, 乐器消费市场一直呈现增长趋势, 钢琴作为乐器制造水平的代表, 是一个国家乐器制造业水平的标志。目前中国已经成为全球最大的钢琴制造与出口国, 但是在产品质量、档次、产品利润率等多方面与传统钢琴制造强国相比仍存在差距。建议我国企业通过增加研发投入、引进更为先进的生产加工技术与装备、加强产学研合作、重视专业技术人员的培养等措施, 努力提升产品质量与品牌知名度, 进一步提升我国钢琴制造业水平。

参考文献:

- ## 参考文献:
- [1] 刘镇波, 刘一星, 于海鹏, 等. 我国民族乐器共鸣用木材声学品质的研究现状与发展趋势[J]. 林业科学, 2010, 46(8): 151-156.
 - [2] 刘镇波, 刘一星. 乐器共鸣板用木材声学振动性能改良研究现状及趋势[J]. 世界林业研究, 2012, 25(1): 44-48.
 - [3] LIU Z B, LIU Y X. Research status and prospect of acoustic vibration properties modification of wood used for soundboard[J]. World Forestry Research, 2012, 25(1): 44-48.
 - [4] 许兰, 葛友婷, 杨阳, 等. 钢琴音板木材的杨氏模量动态法测量及其评价[J]. 林业机械与木工设备, 2014, 42(8): 27-29.
 - [5] XU L, GE Y T, YANG Y, et al. Dynamic measurement and evaluation of Young's modulus of piano soundboard wood[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2014, 42(8): 27-29.
 - [6] 吕少一, 刘美宏, 彭立民, 等. 木质材料在乐器与音箱领域的应用进展[J]. 木材工业, 2020, 34(1): 25-29.
 - [7] LYU S Y, LIU M H, PENG L M, et al. Review of wood material's application in musical instruments and acoustics products[J]. China Wood Industry, 2020, 34(1): 25-29.
 - [8] 捷亚柯诺夫 H A. (关肇元, 金菊生, 译). 钢琴制造[M]. 北京: 轻工业出版社, 1960.
 - [9] 成俊卿. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1985.
 - [10] 约翰·毕肖普, 格雷厄姆·巴克. (庄平贤, 译). 钢琴手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2017.
 - [11] 周薇. 西方钢琴艺术史[M]. 上海: 上海音乐出版社, 2003.
 - [12] 王凯. 如何提高我国钢琴制造业的水平[J]. 科技创新导报, 2011, 35(8): 235-235.
 - [13] 金先彬. 中国钢琴制造业的技术进步[J]. 演艺科技, 2019 (1): 61-64.
 - [14] 刘明. 钢琴音板用材振动性能检测与分选研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2007.
 - [15] 刘镇波. 云杉木材共振板的振动特性与钢琴声学品质评价的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2007.
 - [16] 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.
 - [17] 刘晓楠. 钢琴机械机构的性能分析及对音质的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
 - [18] 古利堂. 音板和弦槌与立式钢琴声辐射特性的关系[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
 - [19] 王谢军, 莫源波. 钢琴涂饰及其发展趋势[J]. 上海涂料, 2013, 51(2): 30-32.
 - [20] 郑泽宇. 基于应力波的木材径切面内部缺陷成像方法研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018.
 - [21] 金先彬. 再谈钢琴质量[J]. 乐器, 2017, 153(1): 16-17.
 - [22] 王嘉宁. 我国钢琴市场定位思考[J]. 合作经济与科技, 2018, 579(4): 100-101.
 - [23] 肖惠天. 国际产业转移背景下的我国乐器产业升级研究[D]. 杭州: 浙江师范大学, 2012.
- (本文编校 向琴)

(本文編校 向 琴)

(上接第5页)

- [37] 余养伦, 于文吉, 邓侃. 我国木(竹)质重组材料技术和产业发展现状及建议[J]. 中国人造板, 2018, 25(6): 1-5.
YU Y L, YU W J, DENG K. Status quo and suggestions for China's scrimber production technology and its industry development[J]. China Wood-Based Panels, 2018, 25(6): 1-5.
 - [38] 余养伦, 张世锋, 闫昊鹏, 等. 一种提高天然纤维材料尺寸稳定性的试剂及其处理方法: CN110592942A[P]. 2019-12-20.
 - [39] Panchireddy S, Grignard B, Thomassin J M, et al. Catechol containing polyhydroxyurethanes as high-performance coatings and adhesives[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(11): 14936-14944.
 - [40] PENG H Y, DU X S, CHENG X, et al. Room-temperature self-healable and stretchable waterborne polyurethane film fabricated via multiple hydrogen bonds[J]. Progress in Organic Coatings, DOI: 10.1016/j.porgcoat.2020.106081.
 - [41] 余春和, 杨雨桐. 植物染料用于木材仿真染色的探讨[J]. 陕西林业科技, 2018, 46(2): 88-90.
YU C H, YANG Y T. The summary of simulation dyeing of wood with natural plant dyes[J]. Shaanxi Forest Science and Technology, 2018, 46(2): 88-90.
 - [42] 刘志军. 木材变色与防护问题的研究状况[J]. 世界林业研究, 2001, 14(5): 31-36.
LIU Z J. Studies on current research situation about wood discoloration and its prevention[J]. World Forestry Research, 2001, 14(5): 31-36.
 - [43] Machová D, Baar J, Paschová Z, et al. Color changes and accelerated ageing in oak wood treated with ammonia gas and iron nanoparticles [J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2019, 77(4): 705-716.
 - [44] 余养伦, 闫昊鹏, 张耀明, 等. 一种变色木质材料及其制备方法: CN110549442A[P]. 2019-12-10.
 - [45] 曹惠敏, 王文斌, 孙伟圣, 等. FeCl_2 处理麻栎木材化学变色工艺及变色机理研究[J]. 林业工程学报, 2020, 5(1): 75-80.
 - [46] CAO H M, WANG W B, WANG W S, et al. Technology and mechanism of chemical discoloration of oak(*Quercus acutissima*) using FeCl_2 solution[J]. Journal of Forestry Engineering, 2020, 5(1): 75-80.
 - [47] FAN H L, WANG J H, ZHANG Q Y, et al. Tannic acid-based multifunctional hydrogels with facile adjustable adhesion and cohesion contributed by polyphenol supramolecular chemistry[J]. ACS Omega, 2017, 2(10): 6668-6676.
 - [48] WANG Z, ZHANG S F, ZHAO S J, et al. Facile biomimetic self-coacervation of tannic acid and polycation: Tough and wide pH range of underwater adhesives[J]. Chemical Engineering Journal, DOI: 10.1016/j.cej.2020.127069.
 - [49] WANG Z, ZHAO S J, SONG R Y, et al. The synergy between natural polyphenol-inspired catechol moieties and plant protein-derived bio-adhesive enhances the wet bonding strength[J]. Scientific Reports, 2017(7): 9664.
 - [50] Pizzi A, Conradie W E, Jansen A. Polyflavonoid tannins—a main cause of soft-rot failure in CCA-treated timber[J]. Wood Science and Technology, 1986, 20(1): 71-81.
 - [51] 余养伦, 张世锋, 于文吉, 等. 一种络合木质材料及其原位络合方法: CN110587746A[P]. 2019-12-20.
 - [52] Patil N, Jérôme C, Detrembleur C. Recent advances in the synthesis of catechol-derived (bio)polymers for applications in energy storage and environment[J]. Progress in Polymer Science, 2018(82): 34-91.
 - [53] LIN Q Q, WU J Y, YU Y L, et al. Immobilization of ferric tannate on wood fibers to functionalize wood fibers/diphenylmethane diisocyanate composites[J]. Industrial Crops and Products, DOI: 10.1016/j.indcrop.2020.112753.
 - [54] 余养伦, 于文吉, 祝荣先, 等. 一种络合木束、络合重组木及其制备方法: CN110587748A[P]. 2019-12-20.
 - [55] 余养伦, 于文吉, 张世锋, 等. 一种络合单板、络合单板复合材料及其制造方法: CN110480764A[P]. 2019-11-22.
- (本文编校 孟凡丹、向琴)

(本文编校 孟凡丹、向 琴)