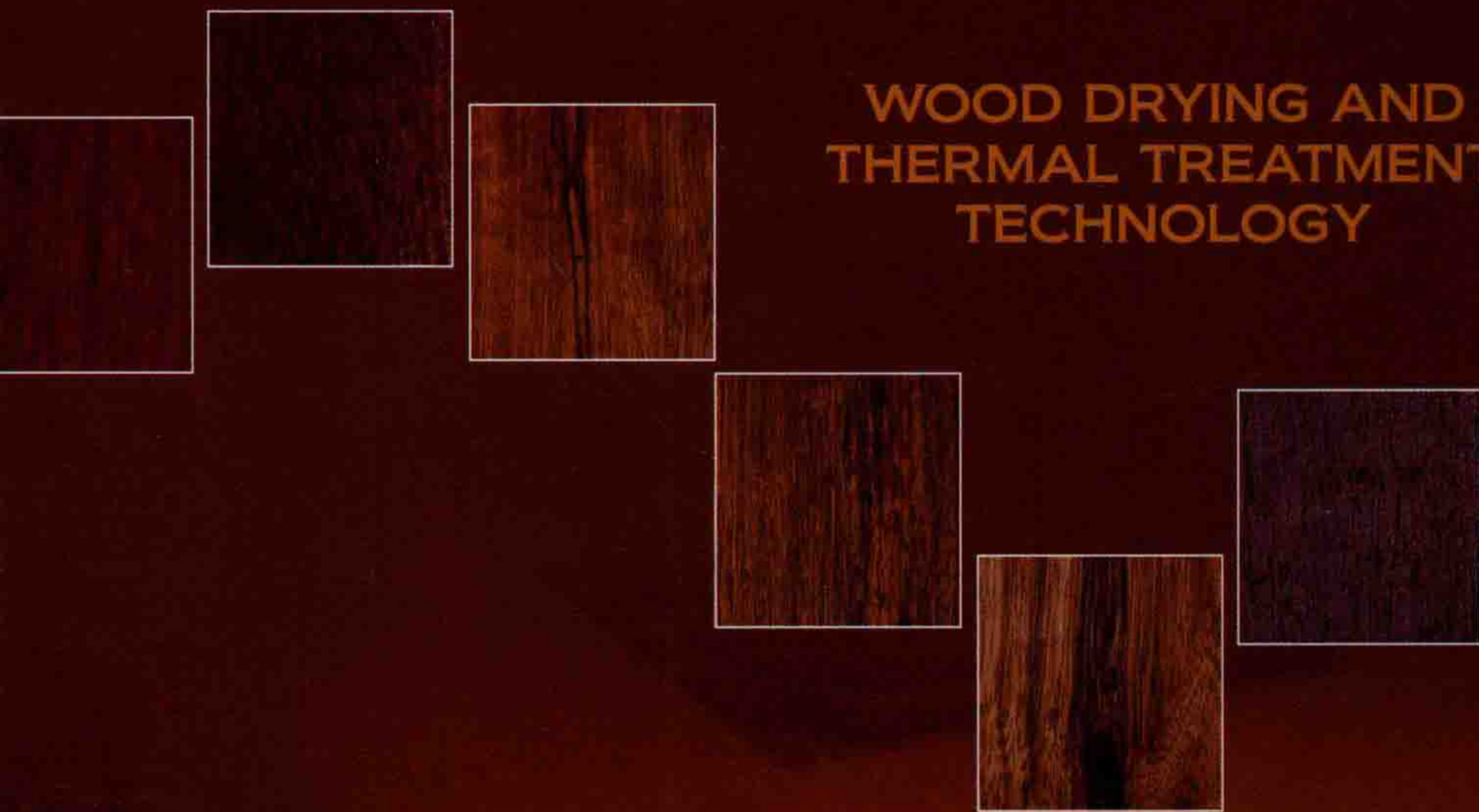




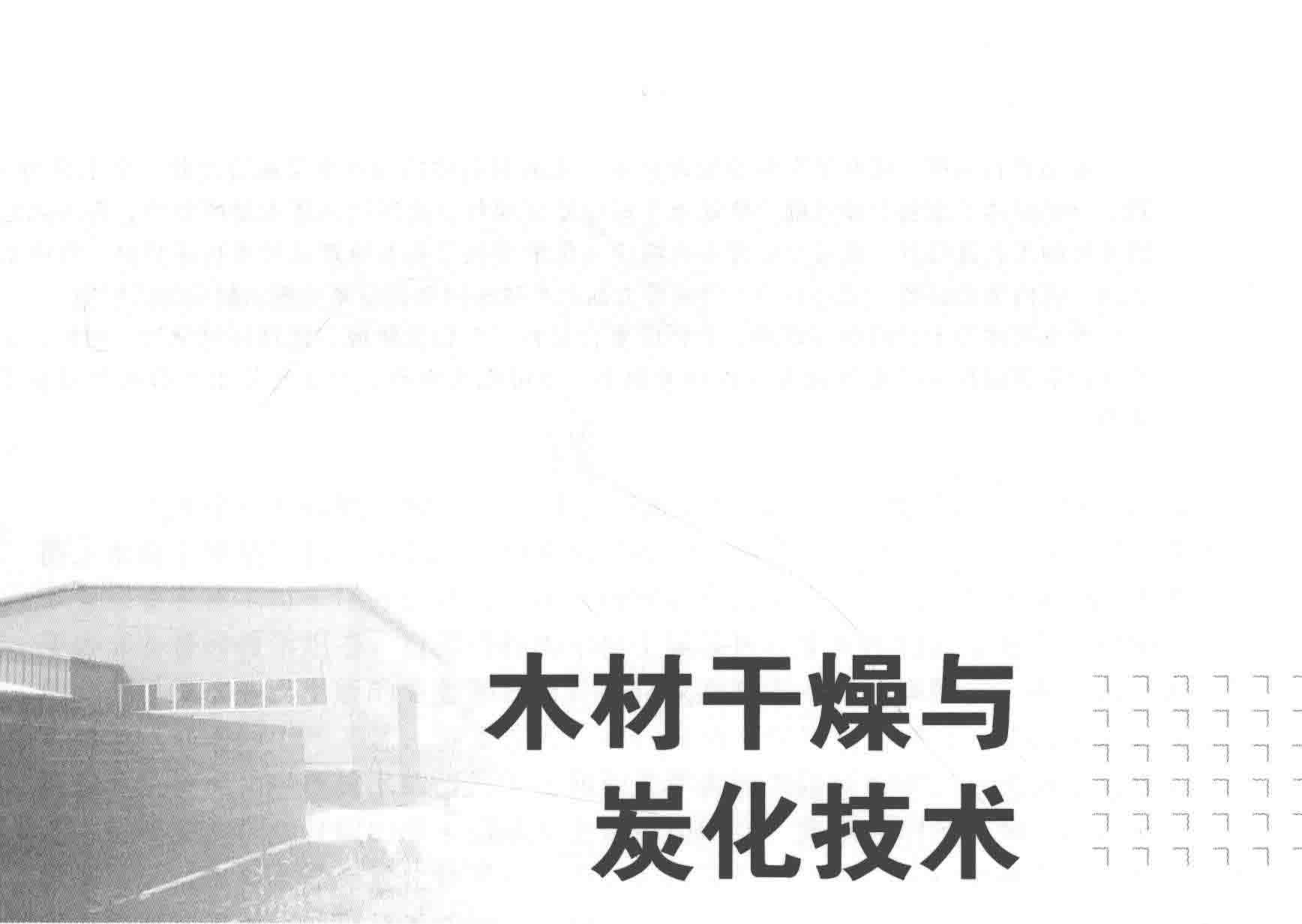
木材干燥与 炭化技术

郭明辉 孙伟伦 编著
李 坚 主审

WOOD DRYING AND
THERMAL TREATMENT
TECHNOLOGY



化学工业出版社



木材干燥与 炭化技术

郭明辉 孙伟伦 编著
李 坚 主审



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是我国第一部有关高温热处理技术与木质材料应用相互交叉融合之作。全书分为 8 章，分别阐述了木材干燥基础、热处理木材的发展现状、高温热处理木材的特性、高温热处理木材的工艺及特点、高温热处理木材物理及化学变化等基本原理及其在仿珍贵材、室内木地板、室内饰面材料、室外轻型木结构等方面的具体应用和高温热处理木材应用的展望。

本书可作为木材科学与技术、生物质复合材料、生物质能源、建筑环境设计、园林、土木工程等领域科研院所研究人员的参考用书，亦可作为生产企业工程技术人员的学习参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

木材干燥与炭化技术/郭明辉，孙伟伦编著. —北京：
化学工业出版社，2017.8
ISBN 978-7-122-29649-8

I. ①木… II. ①郭…②孙… III. ①木材干燥②木材
热解-炭化 (炼焦) IV. ①TQ351.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 102247 号

责任编辑：邢 涛
责任校对：宋 夏

文字编辑：谢蓉蓉
装帧设计：韩 飞

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）
印 装：三河市航远印刷有限公司
710mm×1000mm 1/16 彩插 2 印张 19 字数 381 千字
2017 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899
网 址：<http://www.cip.com.cn>
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：89.00 元

版权所有 违者必究



彩图1 （图6-5）Plato®炭化处理后浅黄榄仁的颜色



彩图2 （图6-6）Plato®炭化处理后杨木的颜色



彩图3 （图6-7）Plato®炭化处理后云杉的颜色



(a)

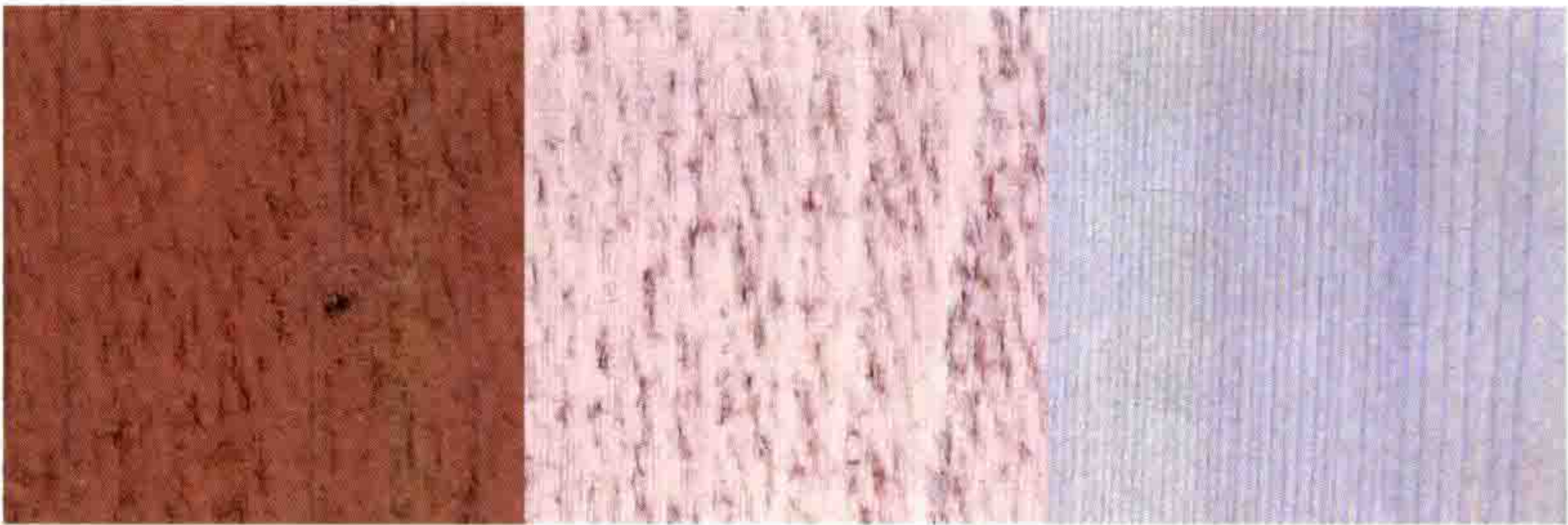


(b)

彩图4 （图8-11）荷兰能源研究中心



乌木黑 胡桃木色 深柚木色 深橡木色



亮松木色 纯白色 老化色

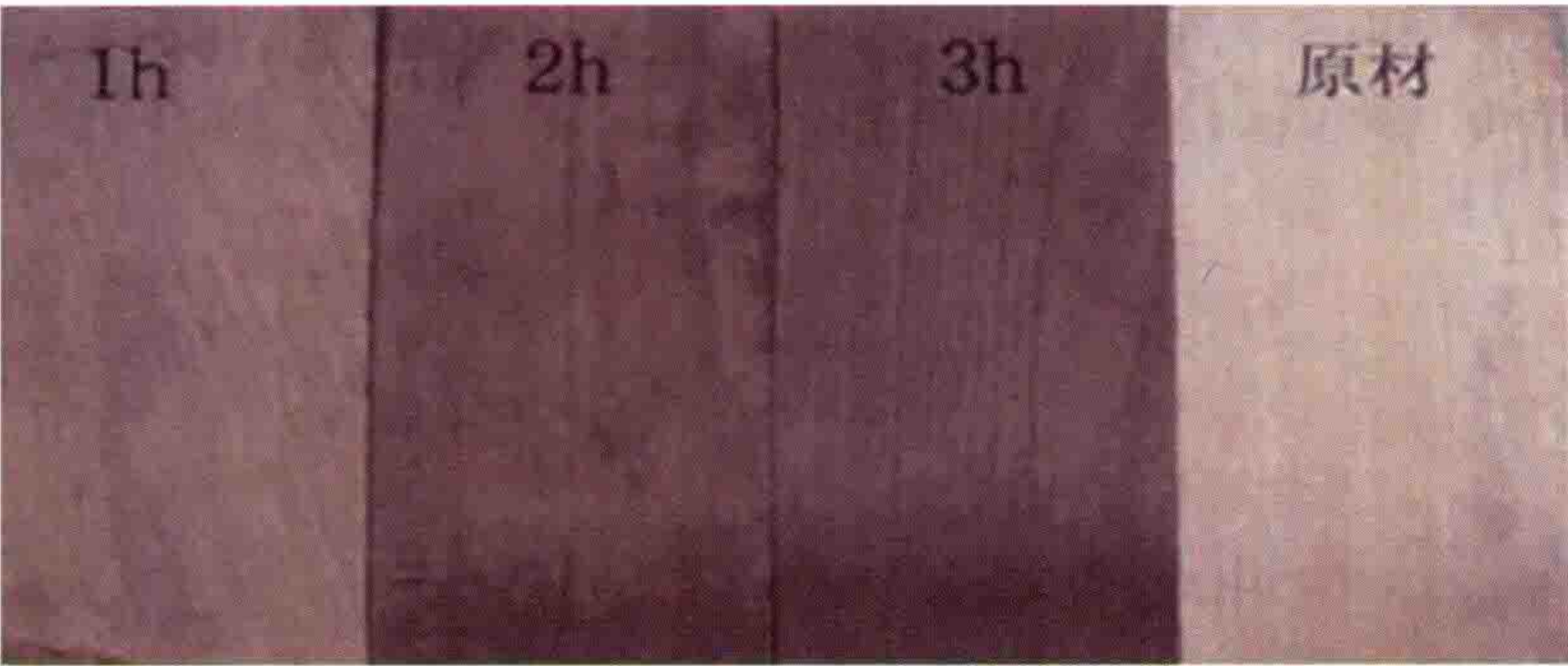
彩图5 （图8-12）Plato®提供的部分颜色

120℃	140℃	160℃	180℃	200℃	220℃

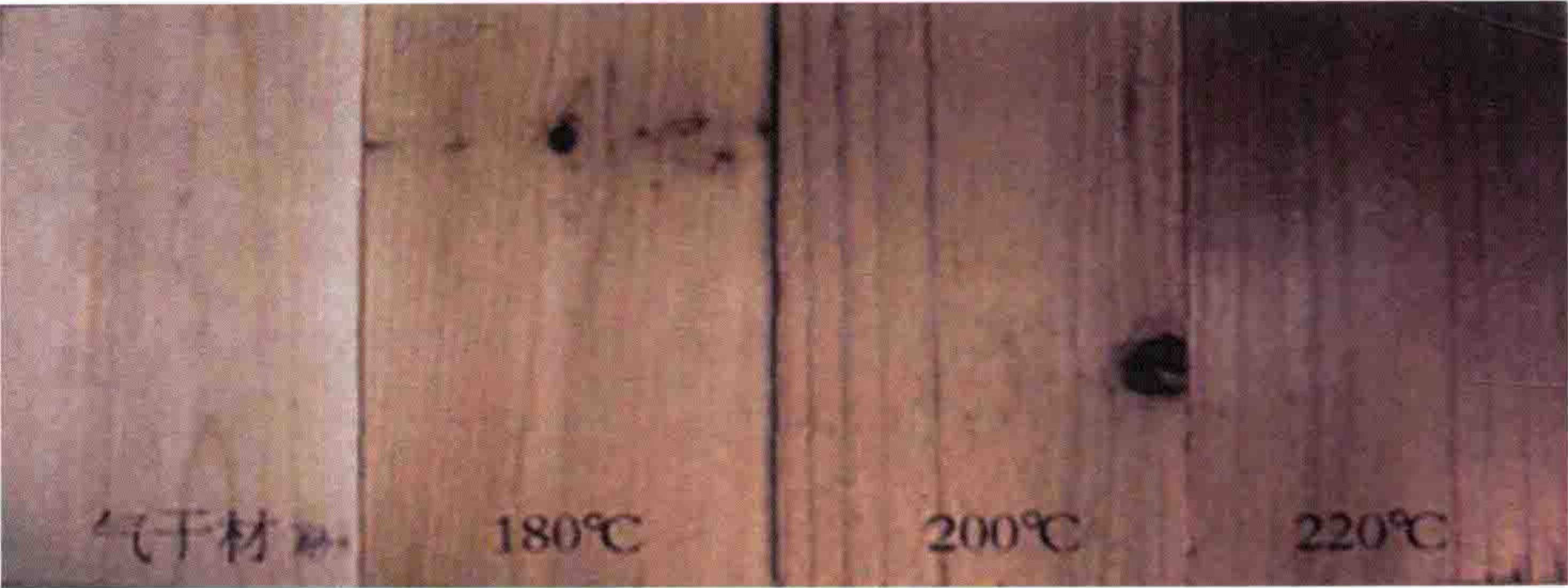
彩图6 （图8-14）Thermo Wood®炭化木的颜色



彩图7 （图8-37）杨木不同热处理温度保温时间为2h的炭化木与原材的颜色



彩图8 （图8-38）杨木不同保温时下的绝干试材与原材的颜色



彩图9 （图8-39）不同热处理温度保温时间为2h的炭化木与原材的颜色(杉木)



彩图10 （图8-40）180℃下不同保温时间炭化木与原气干材的颜色(杉木)

FOREWORD

木材干燥与炭化技术

② 序

炭化处理是木材加工和利用过程中突破性的研究，大大提高了产品的附加值。木材干燥是炭化木实际生产与利用过程中不可或缺的重要环节，多年来，诸多专家学者在木材干燥方面进行了深入研究，取得了大量的科研成果并相继出版了多部专著和教学用书，对促进我国木材干燥领域科学技术的进步起到了积极作用。但纵览这些已出版的专著和教材，都仅仅止步于木材干燥阶段，尚未出现既可对炭化处理的生产工艺、装备技术、基础理论和应用范围进行完整的统筹，又可指导从事炭化生产技术的研发人员和相关学者的书籍或读物。东北林业大学从事木材相关教学和科研的学术团队与企业紧密结合，集多年的理论和实践经验组织编写了《木材干燥与炭化技术》一书，系统完整地阐述了炭化木的生产技术与应用，充实了炭化处理技术的知识文库。

编著者东北林业大学郭明辉教授与哈尔滨三立雅风科技发展有限公司孙伟伦博士多年潜心研究，对木材炭化技术情有独钟，踏实认真地从事木材炭化改性理论教学和企业生产实际工作，共同完成了多项木材炭化方面的科学研究课题，积累了丰富的经验。

木材炭化技术，同时兼有较强的理论性和应用性，二者密不可分，缺一不可。而《木材干燥与炭化技术》一书完美地体现了理论与实践的高度融合，有助于木材应用技术的创新，驱动企业发展，造福社会。

希望今后在相关领域里能够看到更多类似的著作，以促进我国木材科学与技术的快速发展。

中国工程院院士 李坚
2016年11月19日



热处理木材,也称炭化木,尺寸稳定性好,具有优良的耐久性、纹理美观、保温隔热、环保无污染等优点,应用非常广泛,是一种新型环保改性木材。而木材干燥是炭化木实际生产与利用过程当中不可或缺的重要环节,其基础理论和干燥技术也是木材科学与工程、家具设计制造、室内设计与装饰等相关专业的必修专业课之一。

随着优质天然林木材日益减少,如何提升人工速生材及普通经济用材的品质特性已成为木材行业发展面临的严峻问题。通常,这类木材材质相对较差,直接利用干燥后的此类木材难度较大。而木材的高温炭化处理技术恰恰解决了这些问题,经炭化处理干燥后的木材能够有效地提高尺寸稳定性及减轻开裂、变形、易腐朽等缺陷,有效提高人工林速生材的产品附加值。此物理改性方法较化学改性而言,不添加任何化学物质,环保无污染,受到人们的大力追捧。

近些年来,国内出版的一定数量介绍木材相关处理技术的书籍中,仅是对炭化木做了简要的介绍,能够集木材干燥、木材炭化基础特性、木材炭化工艺与设备及炭化木在室内外的应用等方面于一体的内容书籍尚属空白。本书主要介绍木材干燥相关基础理论与技术基础和炭化木基本特性、处理工艺及应用等内容,其特点如下。

① 详细介绍了木材干燥基础,并参考和补全一些应用数据的图表。

② 国内首次详细介绍炭化木的特性,概括了炭化木的工艺技术、变化机理、设备要求以及室内外应用,为广大学者提供了极大的便利。

③ 本书对指导木材炭化和炭化木的生产及使用有着非常重要的作用。

本书从木材基本性质出发,从常温干燥逐步过渡到高温炭化,比较系统完整地阐述了炭化木的生产技术与应用。紧密结合炭化木的生产机理,深入浅出地讲述了炭化木的原料制备、独特性能、制造原理、工艺技术和炭化木的应用等内容。本书编写中力求做到理论与实际相结合,图文并茂,通俗易懂,体现了新知识、新技术、新工艺与新产品,是编者结合自己的实践经验和查阅大量相关资料编辑而成。另外,本书得到了“十二五”国家科技支撑计划课题“结构用木质复合材料构件生命周期与碳排放效应评价的研究”,编号为2015BAD14B0501的资助,在此表示感谢!

本书主要面向从事炭化木生产与应用方面的工程技术人员、管理人员,同时也可供从事炭化木生产技术的研发人员参考,亦可作为木材科学与技术等相关学科本科生、研究生等的参考资料。

限于水平,书中不妥之处恳请读者批评指正。

编者

2017年4月

1 木材的基本性质

1

1.1	木材及其构造特征	1
1.2	木材与水分	1
1.2.1	木材中水分存在的状态	1
1.2.2	木材的纤维饱和点	2
1.2.3	木材含水率及测定	2
1.2.4	木材的平衡含水率	6
1.2.5	木材的水分吸着与解吸	9
1.2.6	木材中水分的移动	12
1.2.7	木材的干缩湿胀	12
1.3	木材的热学性质	17
1.3.1	木材的比热容和热容量	17
1.3.2	木材的热膨胀与热收缩	19
1.3.3	热对木材性质的影响	20
	参考文献	20

2 木材干燥的基本原理与特性

21

2.1	木材干燥的基本原理	21
2.2	木材干燥介质	21
2.2.1	热媒与干燥介质	21
2.2.2	过热蒸汽	21
2.2.3	湿空气	25
2.2.4	炉气	35
2.3	木材干燥过程热质传递与作用	38
2.3.1	热传递的方式	38
2.3.2	干燥室壳体的热损失	42
2.3.3	木材干燥对流换热过程与基本规律	43

2.3.4 干燥过程中木材中水分的移动与蒸发 48

2.3.5 木材常规干燥过程 64

2.3.6 木材干燥过程中的应力与变形 66

参考文献 72

3

常温干燥技术基础

73

3.1 木材干燥设备 73

3.1.1 木材干燥室壳体 73

3.1.2 加热器及其附件 77

3.1.3 气流循环设备 81

3.1.4 进排气系统与喷蒸管 83

3.1.5 材车与检测设备 85

3.2 木材干燥工艺基础 86

3.2.1 木材干燥基准 86

3.2.2 木材干燥基准的选择方法 91

3.2.3 木材干燥基准的软硬度 93

3.3 木材干燥过程的检测 94

3.3.1 干燥介质温湿度的检测 95

3.3.2 木材实际含水率的检测 99

3.3.3 木材平衡含水率的检测 101

3.3.4 木材干燥装备的检测 102

3.3.5 木材干燥质量的检测 104

参考文献 108

4

木材干燥技术

110

4.1 常温干燥 110

4.1.1 准备阶段 110

4.1.2 常规干燥阶段 118

4.1.3 干燥后储存阶段 126

4.2 真空干燥 128

4.2.1 真空环境特点 128

4.2.2 真空干燥的原理 130

4.2.3 真空干燥设备 131

4.2.4 真空干燥工艺 133

4.2.5	真空干燥的特点及应用	135
4.3	高频与微波干燥	136
4.3.1	高频与微波干燥的原理及特点	137
4.3.2	高频干燥设备与工艺	138
4.3.3	微波干燥设备与工艺	140
4.3.4	高频与微波干燥的应用	144
4.4	除湿干燥	144
4.4.1	除湿干燥的原理及设备	144
4.4.2	除湿干燥工艺	147
4.4.3	除湿干燥的实用性	148
4.5	太阳能干燥	149
4.5.1	太阳能干燥原理	150
4.5.2	太阳能干燥设备	151
4.5.3	太阳能干燥工艺	155
4.5.4	太阳能干燥的实用性	156
4.6	高温干燥	157
4.6.1	高温干燥工艺	157
4.6.2	高温干燥对设备性能的要求	162
4.6.3	高温干燥对木材材性的影响	163
4.6.4	高温干燥的特点及适用范围	164
	参考文献	165

5

木材炭化处理技术

167

5.1	木材炭化处理技术	167
5.2	木材炭化处理技术的分类	169
5.2.1	表面高温炭化处理技术	169
5.2.2	深度高温炭化处理技术	169
5.3	木材热处理技术利用及现状	170
	参考文献	173

6

木材炭化处理的工艺及设备

174

6.1	木材炭化处理现有典型工艺	175
6.1.1	荷兰 Plato [®] 工艺	175
6.1.2	芬兰 Thermo Wood [®] 工艺	182

6.1.3 法国炭化处理工艺 189

6.1.4 德国炭化处理工艺 191

6.1.5 中国生物质燃气炭化处理工艺 194

6.2 生产炭化木的现有设备及特点 197

6.3 影响木材炭化处理质量的因素 198

6.3.1 处理温度和处理时间 198

6.3.2 炭化处理介质 199

6.3.3 处理环境 201

6.3.4 树种 201

6.3.5 水热和湿热处理 201

6.3.6 木材尺寸 201

6.3.7 催化剂 202

6.3.8 设备类型 202

参考文献 202

7

木材炭化处理后的化学变化

205

7.1 半纤维素 206

7.2 纤维素 209

7.3 木质素 210

7.4 抽提物 211

参考文献 212

8

炭化木的特性

213

8.1 尺寸稳定性 213

8.1.1 炭化木的干缩湿胀特性 213

8.1.2 炭化木尺寸稳定性提高原因综述 220

8.2 颜色 222

8.2.1 炭化木的颜色变化 223

8.2.2 炭化木颜色变化机理综述 225

8.3 生物耐久性 226

8.3.1 炭化木的生物耐久性 226

8.3.2 炭化木生物耐久性提高原因综述 230

8.4 耐候性 231

8.4.1 炭化木的耐候性 231

8.4.2	炭化木耐候性变化原因综述	234
8.5	疏水性	234
8.5.1	炭化木的疏水性	234
8.5.2	炭化木疏水原理综述	236
8.6	环保性与安全性	236
8.6.1	荷兰 Plato® 工艺炭化木产品的环保性与安全性	236
8.6.2	芬兰 Thermo Wood® 工艺炭化木产品的环保性与安 全性	237
8.6.3	法国工艺炭化木产品的环保与安全性	240
8.6.4	德国工艺炭化木产品的环保与安全性	240
8.7	炭化木的其他相关性能	241
8.7.1	炭化木的密度	241
8.7.2	炭化木的力学性能	243
8.7.3	荷兰 Plato® 工艺炭化木产品的其他性能	247
8.7.4	芬兰 Thermo Wood® 工艺炭化木产品的其他性能	249
8.8	炭化木的加工与工艺性能	252
8.8.1	机械加工性能	252
8.8.2	油漆性能	255
8.8.3	胶合性能	256
8.9	炭化木的应用	257
8.9.1	木材炭化处理仿珍贵材技术	257
8.9.2	内装饰用材	261
8.9.3	室内家具用材	268
8.9.4	外装饰用材	269
8.9.5	地板用材	271
8.9.6	园林景观用材	274
8.9.7	门窗用材	278
8.9.8	雕刻用材	279
8.9.9	木屋	280
8.10	炭化木应用时的注意事项	280
8.10.1	握钉	280
8.10.2	胶合	281
8.10.3	涂装	282
8.10.4	产品保养	282
8.10.5	加工及安装	283
8.11	木材炭化技术的发展趋势	284
	参考文献	285

附录 1 我国 55 个主要城市木材平衡含水率估计值 288

附录 2 按干球温度与干湿球温度差确定的平衡含水率数值 289

附录 3 常压过热蒸汽与高温湿空气的湿度(饱和度)(表内数字
为 Φ) 291

附录 4 湿空气相对湿度表 292

1.1 木材及其构造特征

树木是一种天然生长的生物体，木材随着树木树种的不同，在构造上千差万别，其最小的生物组成单位为细胞，各种细胞的形态和特征不同，排列的状态也不尽相同，这些生物构造上的差异将引起其性质上的差异。

木材中大多数细胞呈纵向排列，少数细胞呈径向排列。木材细胞的细胞壁由薄的初生壁和厚的次生壁组成。其中，次生壁的 S1、S2 和 S3 层的微纤丝螺旋排列取向各不相同，这是引起木材各向异性的主要原因之一，而木材的各向异性也导致了木材在干燥过程中发生不均匀的收缩现象，产生收缩应力，进而引起诸如开裂、皱缩、翘曲等变形以及内部参与应力的产生。因此，木材的解剖学结构特性与木材的干燥间有着密切的关系。

此外，需要强调的是，在木材加工中通常所说的径切板和弦切板与木材学中所述的经切面和弦切面存在一定的区别。在木材生产和流通过程中，借助横切面，将板宽面与生长轮之间的夹角在 $0^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 的板材称为弦切板，将板宽面与生长轮之间的夹角在 $45^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 的板材称为径切板^[1]。

1.2 木材与水分

1.2.1 木材中水分存在的状态

木材是由无数的中空细胞集合而成的空隙体，根据水分在木材中存在的位置不同，水分的存在形态各异。木材中存在的水分，可以分为自由水和结合水（或吸着水）两类。自由水存在于木材的细胞腔以及细胞间隙形成的大毛细管系统中，其性质与液态水的性质接近。结合水存在于细胞壁中，与细胞壁无定形区（由纤维素非结晶区、半纤维素和木质素组成）中的羟基形成氢键结合。在纤维素的结晶区中，相邻的纤维素分子上的羟基相互形成氢键结合，或者形成交联结合，如图 1-1 所示。因此水分不能进入纤维素的结晶区。水分在木材细胞壁中的

位置如图 1-2 所示。对于生材来说，细胞腔和细胞壁中都含有水分，其中自由水的分量随着季节变化，而结合水的量基本保持不变^[2]。

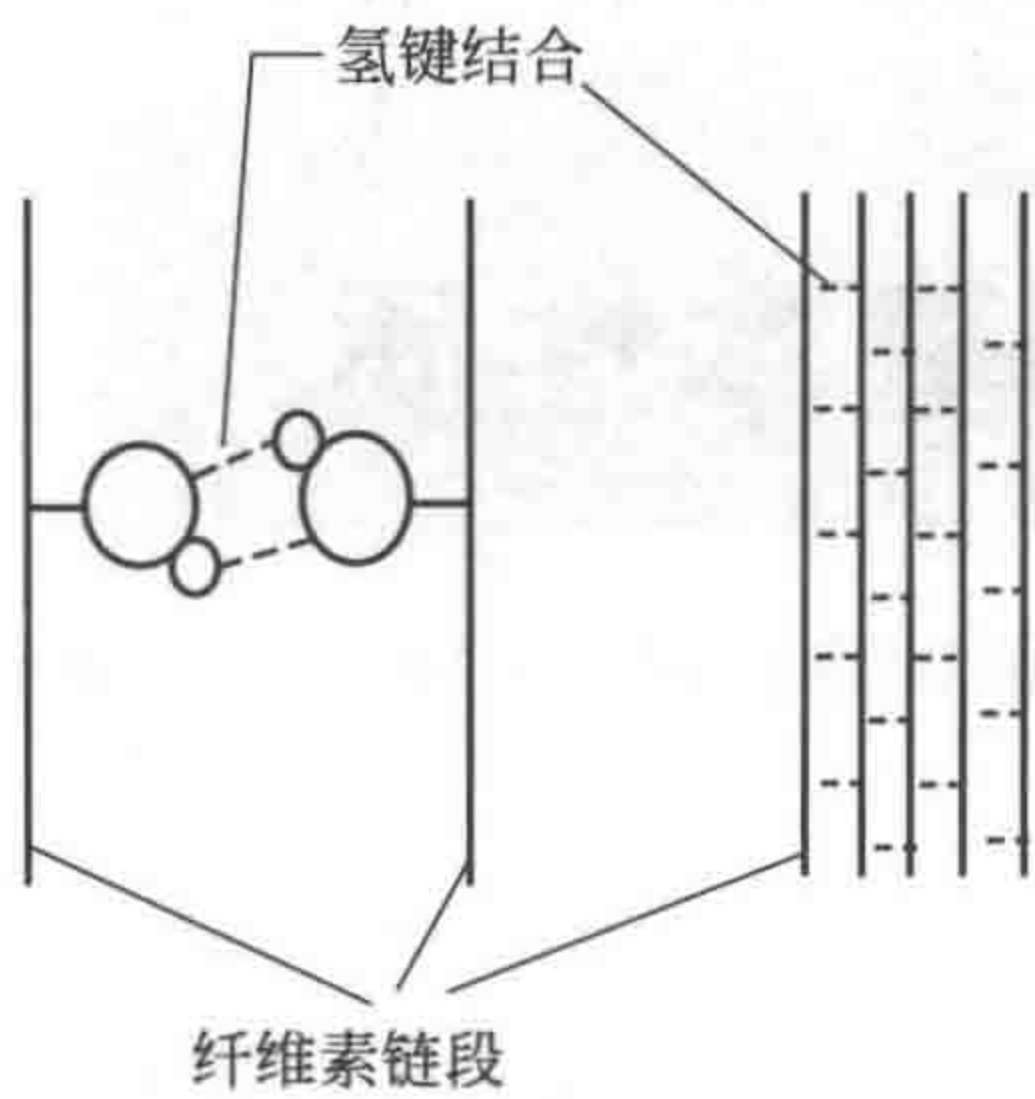


图 1-1 纤维素链段间的氢键结合

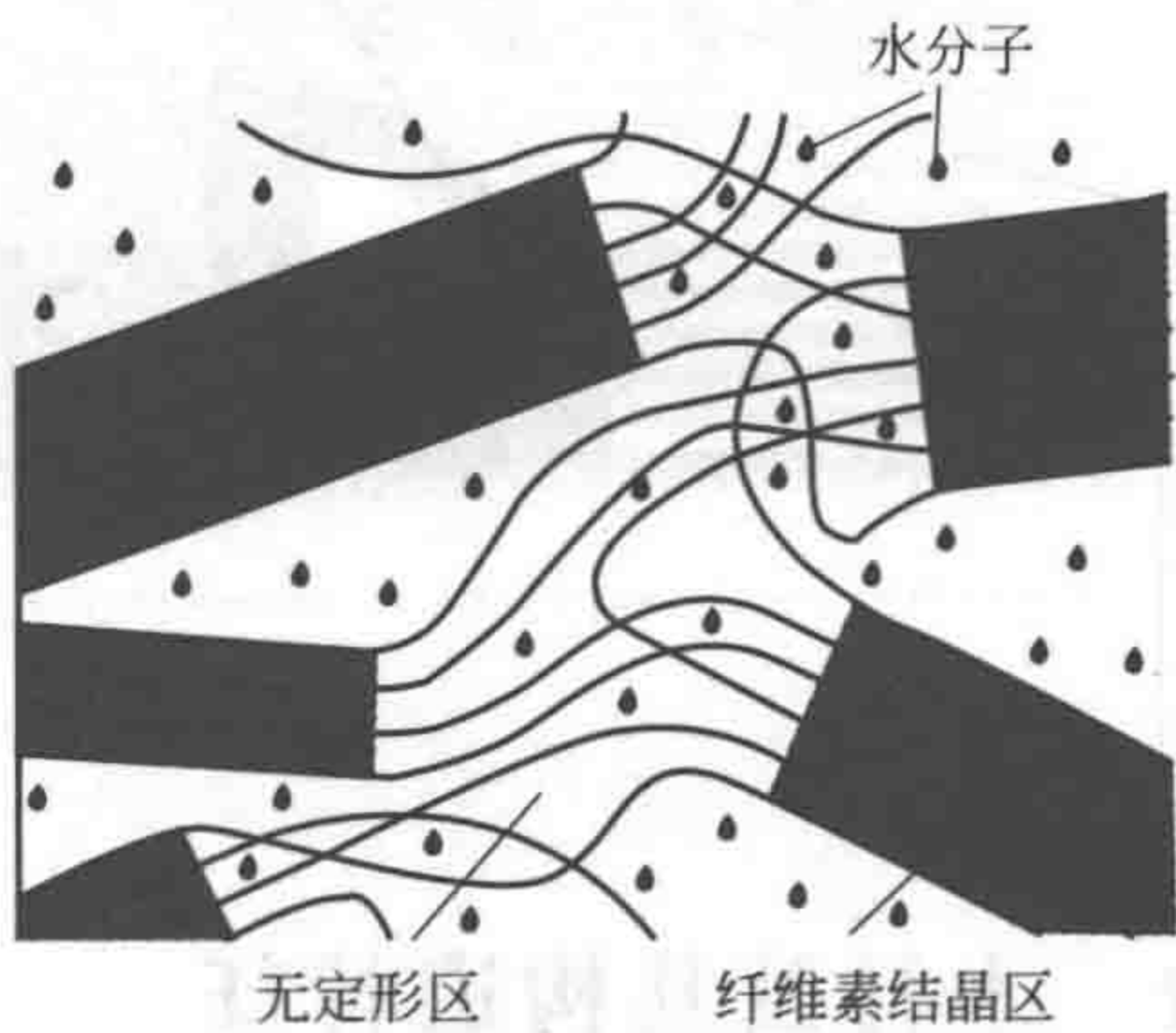


图 1-2 水分在木材细胞壁中的位置

1.2.2 木材的纤维饱和点

当细胞腔中没有自由水，而细胞壁中的结合水量处于饱和状态，这时的状态称为纤维饱和点（fiber saturation point, FSP）。

当把生材放在大气环境中自然干燥时，最终达到的水分平衡态称为气干状态。气干状态的木材细胞腔中不含自由水，细胞壁中含有的结合水的量与大气环境处于平衡状态。当木材的细胞腔和细胞壁中的水分被完全除去时，木材的状态称为绝干状态。木材的不同状态及木材中水分的存在状态及存在位置的对应关系归纳如图 1-3所示，只要细胞腔中含有水分，就说明细胞壁中的水分处于饱和状态。

纤维饱和点是一个临界状态，是木材性质的转折点，因为一般自由水的量对木材的物理性质（除质量外）的影响不大，而结合水含量的多少则对木材的各项物理力学性质都有极大的影响。木材的纤维饱和点因树种而异，一般在 22%~35%的范围内，平均值约为 30%。

纤维饱和点随着温度的升高而变小，当木材含水率高于纤维饱和点时，含水率对木材强度和导电性影响不大，木材亦不会发生收缩或膨胀。木材含水率低于纤维饱和点时，随含水率的减小，木材的导电性减弱，强度和收缩增大；反之，随着含水率的增加，则木材湿胀增大，强度降低，导电性增强。纤维饱和点这一概念十分重要，可用来解释木材在干燥过程中发生的缺陷，准确掌握每一树种木材的纤维饱和点，可较好地控制干燥过程。

1.2.3 木材含水率及测定

1.2.3.1 木材含水率

木材中水分含量的多少通常采用含水率（moisture content, MC）来表示，