

北京林业大学  
研究生教学用书  
建设基金资助

SUPPORTED BY GRADUATE  
TEXTBOOK FUND OF BJFU

# 林业工程 研究进展

ADVANCES OF  
RESEARCH ON  
FOREST PRODUCTS AND  
ENGINEERING

(北京林业大学研究生院组织编写)

主 编 / 李文彬 赵广杰 殷 宁  
副主编 / 潘定如 于志明 戚春华

中国环境科学出版社

北京林业大学  
研究生教学用书  
建设基金资助

# 林业工程 研究进展

(北京林业大学研究生院组织编写)

主 编/李文彬 赵广杰 殷 宁  
副主编/潘定如 于志明 戚春华

中国环境科学出版社·北京

**图书在版编目(CIP)数据**

林业工程研究进展/李文彬等主编. —北京: 中国环境科学出版社, 2005. 1  
北京林业大学研究生教学用书  
ISBN 7-80209-031-8

I. 林… II. ①李… III. 林业—研究生—教材 IV. S7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 141471 号

---

出版发行 中国环境科学出版社  
(100062 北京崇文区广渠门内大街 16 号)  
网 址: <http://www.cesp.cn>  
电子信箱: [bjzhouyu@126.com](mailto:bjzhouyu@126.com)  
电话(传真): 010—67112734

印 刷 北京市联华印刷厂  
经 销 各地新华书店  
版 次 2005 年 5 月第一版 2005 年 5 月第一次印刷  
印 数 1—3000  
开 本 787×1092 1/16  
印 张 25.75  
字 数 600 千字  
定 价 50.00 元

---

**【版权所有, 请勿翻印、转载, 违者必究】**

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

## 前 言

近年,我国研究生招生规模不断扩大,木材科学与技术学科、林产化学加工工程学科和森林工程学科的硕士点数也几乎遍布全国所有林业院校,同时该三个二级学科所属的林业工程一级学科博士学位授权点也在不断增加。为了适应研究生培养的需要,我们编写了《林业工程研究进展》一书,作为研究生教学用书。

本书内容覆盖了林业工程一级学科各个方面,反映了近年来国内外研究的现状和发展趋势,本书可作为林业工程领域的研究生教学用书,也可作为本科生的教学参考书,同时可为林业工程领域科研人员提供思路。

由于林业工程覆盖的面很广,本书分为三篇:第一篇为木材科学与技术篇,该篇分为17章。参加第一篇编写的有赵广杰(第一、二章),罗文圣(第三章),王洁瑛(第四、五章),曹金珍(第六章),张璧光(第七、九章),常建民(第八章),王丽宇(第十章),李建章、周文瑞(第十一、十二、十三章),古野毅(第十一章),于志明(第十二、十六章),张德荣(第十三章),习宝田(第十四章),董万才(第十五章),张求慧(第十七章)。第二篇为林产化学加工工程篇,该篇分为六章。参加第二篇编写的有潘定如、宋先亮(第十八章),曹文军(第十九章),殷宁、何静(第二十章),张婕、黄镇亚(第二十一章),姚春丽、樊永明(第二十二章),吴玉英(第二十二、二十三章),张力平(第二十三章)。第三篇为森林工程篇,该篇分为五章,参加第三篇编写的有赵秀海(第二十四章),戚春华(第二十五章第一至五节、第二十六章),朱守林(第二十六章第七节、第八节),王乃康、苏初旺(第二十七章),李文彬(第二十八章)。

本书由茅也冰教授、鹿振友教授和吴定新教授主审,他们对书稿进行了认真细致的审阅,提出了宝贵的意见,在此表示衷心感谢。本书的编写和出版得到了北京林业大学研究生院的大力支持,得到了北京林业大学工学院华丽女士的帮助,在此表示衷心感谢。

本书获得了北京林业大学研究生教学用书建设基金的资助。

由于编者水平有限,书中错误与不足之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编 者

2003年12月于北京

# 目 录

## 第一篇 木材科学与技术

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 第一章 木材的化学流变学——基础构筑及研究现状 .....        | 3  |
| 第一节 化学流变学基础 .....                    | 3  |
| 第二节 木材的化学流变学研究现状 .....               | 6  |
| 第二章 木材细胞壁的构造及其主成分的堆积过程 .....         | 10 |
| 第一节 纤维素微纤丝形态学及其内部构造 .....            | 10 |
| 第二节 木材细胞壁的壁层构造 .....                 | 11 |
| 第三节 微纤丝的生成及排列取向 .....                | 13 |
| 第四节 木质部细胞壁主成分形成及其堆积 .....            | 14 |
| 第三章 木材细胞壁的空隙构造及其物质的输运过程 .....        | 20 |
| 第一节 木材细胞壁的空隙构造 .....                 | 20 |
| 第二节 木材细胞壁中物质的输运过程 .....              | 22 |
| 第三节 细胞壁中物质的平衡态分布 .....               | 23 |
| 第四节 影响物质在细胞壁中输运的因素 .....             | 23 |
| 第五节 几个问题与设想 .....                    | 24 |
| 第四章 木材变定的产生、回复及其永久固定 .....           | 27 |
| 第一节 木材变定的概念及特征 .....                 | 27 |
| 第二节 木材变定的产生和回复 .....                 | 28 |
| 第三节 木材变定的永久固定 .....                  | 31 |
| 第四节 几点看法 .....                       | 37 |
| 第五章 $\gamma$ 射线辐射对木材构造和物性的影响 .....   | 41 |
| 第一节 高能射线的种类 .....                    | 41 |
| 第二节 射线辐射对木材的作用机理 .....               | 42 |
| 第三节 射线辐射对木材构造的影响 .....               | 43 |
| 第四节 射线辐射对木材或纤维素化学性质的影响 .....         | 44 |
| 第五节 射线辐射对木材或纤维素物理性质的影响 .....         | 45 |
| 第六节 射线辐射对木材力学性质的影响 .....             | 48 |
| 第七节 利用射线辐射固定木材变定和研究变定永久固定机理的构想 ..... | 49 |

|                                            |     |
|--------------------------------------------|-----|
| <b>第六章 木材的机械吸湿蠕变</b> .....                 | 52  |
| 第一节 木材的机械吸湿蠕变现象的特征 .....                   | 52  |
| 第二节 解释木材的机械吸湿蠕变现象的几种代表观点 .....             | 53  |
| 第三节 解释木材的机械吸湿蠕变现象的构想 .....                 | 57  |
| <b>第七章 我国木材干燥技术的现状与国内外发展趋势</b> .....       | 62  |
| 第一节 我国木材干燥技术的研究现状 .....                    | 62  |
| 第二节 木材干燥技术的发展趋势 .....                      | 66  |
| <b>第八章 木材干燥的理论研究动态与数学模型</b> .....          | 70  |
| 第一节 木材干燥的数学模型 .....                        | 71  |
| <b>第九章 木材干燥的新技术</b> .....                  | 81  |
| 第一节 太阳能干燥技术与设计基础 .....                     | 81  |
| 第二节 热泵除湿干燥技术与节能分析 .....                    | 86  |
| 第三节 真空过热蒸汽干燥理论与技术进展 .....                  | 91  |
| <b>第十章 木材中的裂纹与断裂</b> .....                 | 102 |
| 第一节 木材中裂纹的种类 .....                         | 102 |
| 第二节 干燥后木材中的裂纹及木材的正交各向异性特征 .....            | 103 |
| 第三节 木材断裂力学的基础理论 .....                      | 104 |
| 第四节 木材平面应变断裂韧度的测定 .....                    | 105 |
| 第五节 裂纹对木材强度的影响 .....                       | 109 |
| <b>第十一章 木材的乙酰化和丙酰化研究及其应用进展</b> .....       | 116 |
| 第一节 乙酰化木材的性能 .....                         | 116 |
| 第二节 乙酰化木材的研究及应用进展 .....                    | 117 |
| 第三节 乙酰化和其他改性方法的复合 .....                    | 118 |
| 第四节 丙酰化和其它酰化木材研究进展 .....                   | 119 |
| 第五节 无机物—丙酰化木材复合材料 .....                    | 120 |
| <b>第十二章 木材工业用酚醛树脂胶粘剂的快速固化研究与应用现状</b> ..... | 122 |
| 第一节 酚醛树脂胶粘剂合成配方、工艺改进 .....                 | 122 |
| 第二节 催化剂的添加 .....                           | 123 |
| 第三节 酚醛树脂胶粘剂与其它胶粘剂的复合 .....                 | 124 |
| 第四节 酚醛树脂胶粘剂调胶及人造板热压工艺改进 .....              | 124 |
| <b>第十三章 脲醛树脂胶粘剂及其制品低毒化研究新进展</b> .....      | 126 |
| 第一节 脲醛树脂胶粘剂合成配方改进 .....                    | 127 |
| 第二节 脲醛树脂胶粘剂合成工艺改进 .....                    | 128 |
| 第三节 脲醛树脂胶粘剂调胶及人造板热压工艺改进 .....              | 129 |
| 第四节 甲醛吸附材料与人造板等的复合 .....                   | 130 |
| 第五节 人造板及其制品的后处理 .....                      | 130 |
| <b>第十四章 木材加工锯的现状与展望</b> .....              | 133 |
| 第一节 锯机发展历史的回顾 .....                        | 133 |

|             |                           |            |
|-------------|---------------------------|------------|
| 第二节         | 传统锯机与现代锯机 .....           | 134        |
| 第三节         | 研发中的新型导向锯机 .....          | 135        |
| 第四节         | 锯条与锯片材料 .....             | 138        |
| 第五节         | 锯齿材料 .....                | 138        |
| 第六节         | 锯条与锯片的振动 .....            | 140        |
| 第七节         | 锯条与锯片的稳定性 .....           | 141        |
| 第八节         | 临界速度理论 .....              | 141        |
| 第九节         | 锯片中的应力及其对稳定性的影响 .....     | 143        |
| 第十节         | 锯片厚度、直径和夹持比对其稳定性的影响 ..... | 146        |
| 第十一节        | 锯片结构对其稳定性的影响 .....        | 146        |
| 第十二节        | 锯片上的槽孔对其稳定性的影响 .....      | 147        |
| 第十三节        | 锯片动态受载对其稳定性的影响 .....      | 148        |
| 第十四节        | 噪声与降噪技术 .....             | 149        |
| 第十五节        | 锯条与锯片的适张处理 .....          | 150        |
| 第十六节        | 适张检测 .....                | 151        |
| 第十七节        | 锯片的平整与检测 .....            | 153        |
| 第十八节        | CAD 在锯片设计中的应用 .....       | 154        |
| 第十九节        | 锯齿的视频检测技术 .....           | 155        |
| <b>第十五章</b> | <b>木材工业质量认证 .....</b>     | <b>156</b> |
| 第一节         | 质量认证的概念 .....             | 156        |
| 第二节         | 典型的质量认证制度 .....           | 157        |
| 第三节         | ISO9000 族标准的产生和发展 .....   | 158        |
| 第四节         | 国内外质量认证概况 .....           | 159        |
| 第五节         | 我国木材工业质量认证的现状与趋势 .....    | 166        |
| <b>第十六章</b> | <b>木材染色技术发展概况 .....</b>   | <b>172</b> |
| 第一节         | 木材染色技术的历史与现状 .....        | 172        |
| 第二节         | 木材染色技术发展趋势 .....          | 176        |
| <b>第十七章</b> | <b>木材的苯酚及多羟基醇液化 .....</b> | <b>180</b> |
| 第一节         | 木材液化的方法 .....             | 180        |
| 第二节         | 木材的苯酚液化和多羟基醇液化 .....      | 182        |
| 第三节         | 木材主成分的液化反应路径 .....        | 183        |
| 第四节         | 木材液化的生成物 .....            | 186        |
| 第五节         | 几点思考 .....                | 186        |

## 第二篇 林产化学加工工程

|             |                          |            |
|-------------|--------------------------|------------|
| <b>第十八章</b> | <b>植物纤维化学的研究状况 .....</b> | <b>193</b> |
| 第一节         | 化学成分的现代分析手段 .....        | 193        |
| 第二节         | 应用研究 .....               | 197        |

|                                            |            |
|--------------------------------------------|------------|
| 第三节 木材改性研究 .....                           | 201        |
| 第四节 生物降解 .....                             | 202        |
| <b>第十九章 化工设备的研究进展 .....</b>                | <b>209</b> |
| 第一节 气液传质设备 .....                           | 209        |
| 第二节 干燥设备 .....                             | 215        |
| <b>第二十章 林产精细化学品加工研究进展 .....</b>            | <b>221</b> |
| 第一节 非木林产品资源及化学利用 .....                     | 221        |
| 第二节 松节油化学精细加工进展 .....                      | 224        |
| 第三节 松香再加工产品的研究进展 .....                     | 229        |
| 第四节 植物单宁化学与利用的研究进展 .....                   | 233        |
| 第五节 其他林产资源利用的研究进展 .....                    | 236        |
| <b>第二十一章 木质纤维降解利用的新动向——功能性低聚糖的开发 .....</b> | <b>245</b> |
| 第一节 林产资源的生物利用 .....                        | 245        |
| 第二节 木质纤维及其降解 .....                         | 245        |
| 第三节 功能性低聚糖的研究 .....                        | 246        |
| <b>第二十二章 制浆造纸工程 .....</b>                  | <b>255</b> |
| 第一节 制浆技术新发展及科研动向 .....                     | 255        |
| 第二节 制浆造纸机械的发展趋势 .....                      | 264        |
| <b>第二十三章 环境工程技术研究现状 .....</b>              | <b>275</b> |
| 第一节 水处理技术研究现状 .....                        | 275        |
| 第二节 固体废弃物处理技术研究现状 .....                    | 280        |
| 第三节 大气污染治理技术研究现状 .....                     | 282        |

### 第三篇 森林工程

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| <b>第二十四章 林业理论研究 .....</b>    | <b>287</b> |
| 第一节 森林可持续经营 .....            | 287        |
| 第二节 森林可持续经营认证 .....          | 291        |
| 第三节 生态系统管理 .....             | 294        |
| 第四节 生态采伐 .....               | 298        |
| <b>第二十五章 森林作业与环境研究 .....</b> | <b>301</b> |
| 第一节 森林作业对林地土壤的影响 .....       | 301        |
| 第二节 森林作业对林地内保留木的影响 .....     | 309        |
| 第三节 森林作业对气候的影响 .....         | 311        |
| 第四节 森林作业对森林生物多样性的影响 .....    | 315        |
| 第五节 森林作业对森林景观的影响 .....       | 316        |
| 第六节 森林采运作业环境成本分析 .....       | 316        |
| 第七节 森林采运作业环境成本核算研究 .....     | 320        |

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| <b>第二十六章 林道规划理论研究 .....</b>     | <b>326</b> |
| 第一节 林道网理论研究现状 .....             | 326        |
| 第二节 伐区林道网理论基础 .....             | 327        |
| 第三节 林道网规划理论研究 .....             | 332        |
| 第四节 伐区林道网规划应用研究 .....           | 333        |
| 第五节 林道网配置与合理密度的研究 .....         | 342        |
| 第六节 林道网对土壤侵蚀的影响 .....           | 348        |
| <b>第二十七章 森林作业机械研究 .....</b>     | <b>353</b> |
| 第一节 森林作业机械研究的广义性与特殊性 .....      | 353        |
| 第二节 森林作业机械设计理论 .....            | 357        |
| 第三节 林业机器系统 .....                | 374        |
| 第四节 森林作业方式和机械对林地内保留木的影响 .....   | 379        |
| 第五节 生态型森林作业设备研究 .....           | 382        |
| <b>第二十八章 森林作业的人类工效学研究 .....</b> | <b>385</b> |
| 第一节 林业机械作业中的安全性问题 .....         | 385        |
| 第二节 机械作业事故与人体疲劳 .....           | 387        |
| 第三节 人体疲劳的生理学研究 .....            | 387        |
| 第四节 人体疲劳的人类工效学研究 .....          | 388        |
| 第五节 人体疲劳评价方法的研究 .....           | 395        |
| 第六节 减少林业机械作业人体疲劳的工效学建议 .....    | 397        |
| 第七节 林区道路设计的人类工效学 .....          | 397        |

## 第一篇 木材科学与技术



## 第一章 木材的化学流变学——基础构筑及研究现状

流变学(Rheology)是关于变形和流动的学问。这一定义,始自于 Bingham。1929年,美国设立了流变学学会。其后 40 年间,流变学在理论和实验方面的研究都得到了长足的进步,尤其在高分子领域的发展惊人。20 世纪 50 年代初,化学流变学(Chemical Rheology)研究开始起步,主要研究集中在高分子材料的交联(或架桥)、裂解、劣化方面。这时期,主要研究阵容是以化学流变学的开创者 Tobolsky 为代表的学派。当时,村上日本化学流变学研究领域的主要代表者。木材的化学流变学研究始于青木务。近年来,日本学者则元京等又开展了水蒸气,热处理木材的化学流变学研究。在我国高分子材料领域有关化学流变学方面的研究为数不多,在木材科学领域,作者虽做过一些尝试性的工作,但其涉足者可以说是寥若晨星。鉴于此,作者在讨论木材的化学流变学的基础理论构筑的基础上,归纳介绍了迄今为止有关木材的化学流变学的研究现状,使国内同仁对该领域的研究工作有一个比较全面的了解。

### 第一节 化学流变学基础

#### 一、变形和流动

众所周知,遵从 Hooke 弹性定律的物体是弹性体,遵从 Newton 粘性定律的流体是 Newton 流体。前者是弹性力学研究的对象,后者是流体力学研究的对象。但是,许多物质的性质或行为是介于 Hooke 弹性体和 Newton 流体的中间,这些则属于一般变形和流动所涉及的流变学领域。图 1-1 是英国流变学会发表的关于变形和流动的分类图。图中最左端是服从 Hooke 定律的理想弹性体,右端则是服从 Newton 定律的粘性流体。(II)是不服从 Hooke 定律的弹性体, $\epsilon$  和  $\sigma$  之间关系是非线性,但卸载后变形能够瞬间回复到初始状态。从这个意义上来看,属于理想弹性变形。非理想的弹性变形,即使在一定应力作用下,变形随时间变化,卸载后变形渐渐地减少,完全回复者(III),或残留永久变形(不完全回复者)(IV)两种。前者是在一定应力作用下,经过充分时间后,得到一定的变形。但变形和应力之间未必呈线性关系。后者(不完全回复)变形中存在着流动部分。有一种是应力小时不产生流动(IV),另一种是即使应力小也会产生流动(VII)。

一般,称应力超过某个界限时,开始发生流动者为塑性(plasticity),称此应力界限值为屈服值(yield value)。图中(IV),(V),(VI)属于此类。(V),(VI)卸载时,有残留变形,因此不属于弹性变形范围,属于流动。在塑性流动中,把超过屈服值时发生的流动行为和 Newton 流体相同者叫做宾汉姆(Bingham)塑性。(VII)和(VIII)变形速度  $d\varepsilon/dt$  与应力之间呈非比例关系,因此属于非 Newton 流体,但(VII)卸载后,变形会稍许回复初始状态,因此,还具有弹性性质。

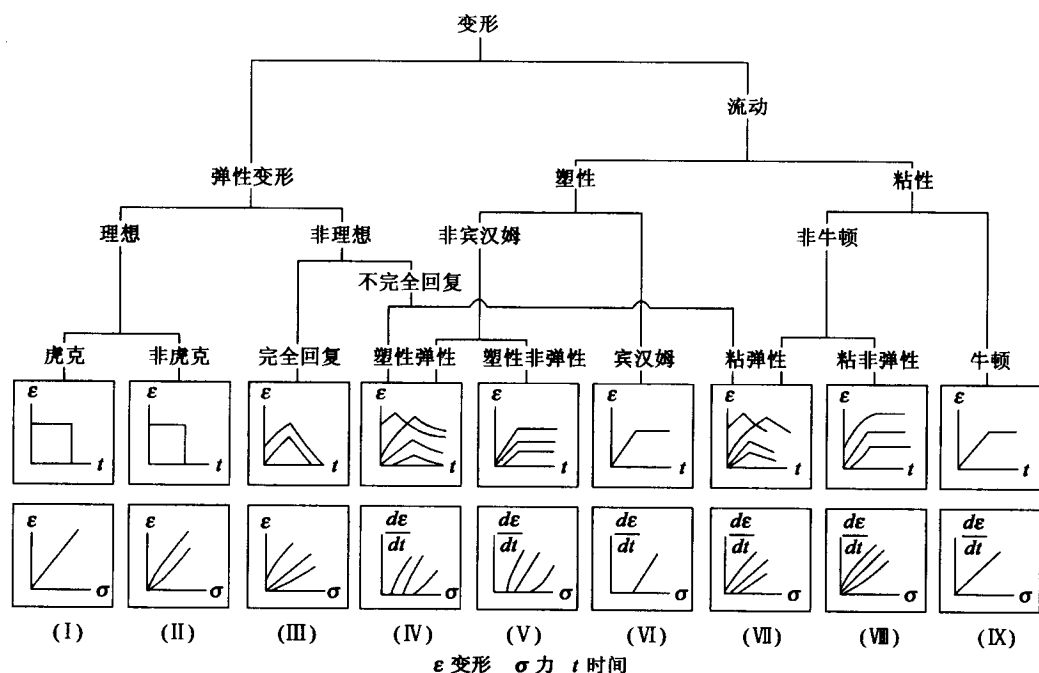


图 1-1 一般变形和流动的分类

## 二、物理流变学和化学流变学

高分子物性的变化通常伴随着内部构造的变化发生,按其内部构造变化性质可分为:一次结合(共价键、离子键、金属键)的生成和消失及二次结合(氢键结合、范德华力)的生成和消失。一般将基于一次的结合变化来研究高分子物性变化的领域称为化学流变学,基于二次结合的变化来研究高分子物性变化的领域称为物理流变学。一般情况下,高分子一切物质的物性变化,或基于物理变化,或基于化学变化,或同时基于物理、化学变化引起的。Stein 和 Tobolsky 将高分子的应力松弛(stress relaxation)与高分子构造变化之间的对应关系做了分类说明。图 1-2 中 A 是基于高分子构造中一次结合的变化(分子链切断,生成),属于化学应力松弛。图中(a)是分子链切断,(b)是交换反应,(c)是架桥结合反应。B 是基于高分子的结晶弯曲部分的回复所引起的松弛,高分子的宏观构造没有发生变化,因此,复折射率 B 不变化,属于物理应力松弛。C 是结

晶部分的再取向, D 则是非结晶部分的结晶化出现的应力松弛, 两种情况都增大了高分子的各向异性, 复折射率也增大, 如图 (e) 和 (f)。图 1-2 中 E 是基于粘性流动或扩散而引起的应力松弛, 复折射率 B 随时间减少。B~E 部分属于物理应力松弛范围。

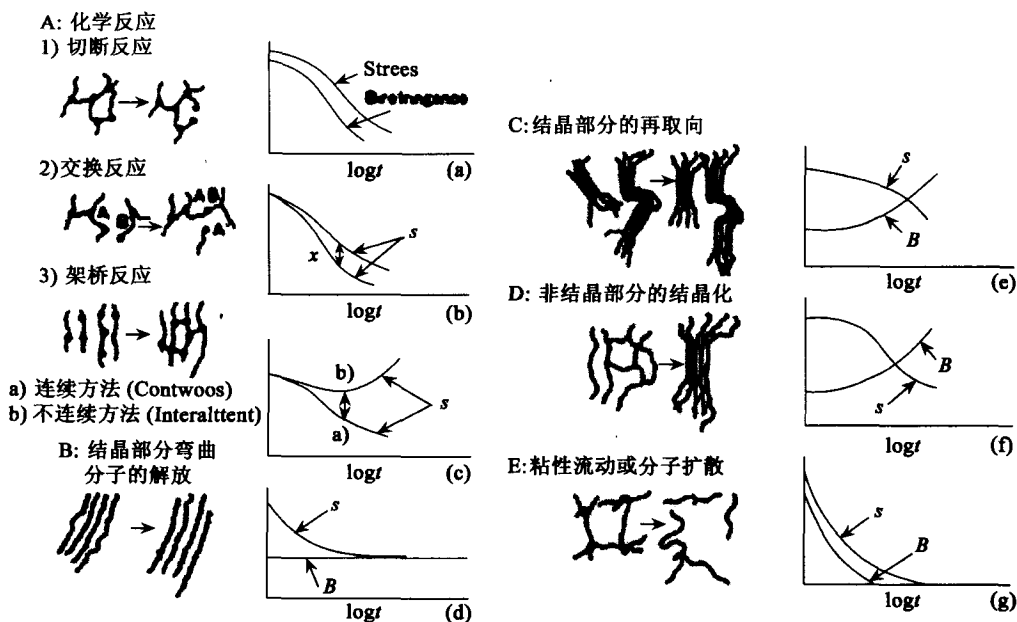


图 1-2 高分子构造变化与应力松弛之间关系

### 三、化学流变学研究的特征

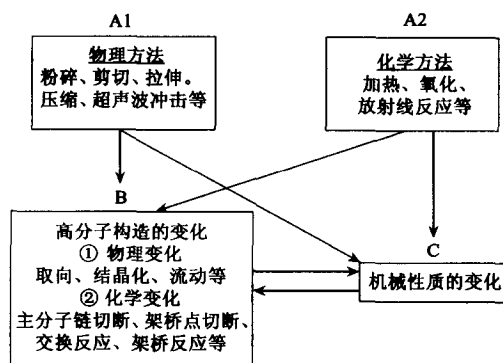


图 1-3 化学流变学研究的特征

图 1-3 所示机械、化学条件与高分子构造和特性之间的关系。由物理手段研究高分子构造的变化, 即  $A_1 \rightarrow B$ 。  $A_2 \rightarrow B$  则是用化学手段来研究高分子构造的变化。表中  $A_1 \rightarrow B$ ,

$A_1 \rightarrow C$  研究很多,但是,  $A_1, A_2 \rightarrow B \rightleftharpoons C$  研究十分少。即在  $A_1$  或  $A_2$  条件下,聚合物发生构造变化而成为  $B$  状态。利用  $C$  状态能够连续、详细地研究处于  $B$  状态高分子构造变化,得到其他研究手段所不可能提供的新信息,这就是化学流变学研究的特征。而且,化学流变学的观察,通过高聚物的蠕变、应力松弛、扭转的测定是可能的,且测定简便、经济。

#### 四、不连续应力松弛测定法 Tobolsky

最早利用不连续化学应力松弛方法,分离了在高温条件下高分子发生的分子链切断和架桥反应,定量了架桥反应。Tobolsky 方法解析的前提条件如下:①当试料保持一定伸长状态时,发生的应力松弛是由于分子链切断引起的。②即使试料中发生架桥反应,但对试料保持一定长度状态下的连续应力松弛无影响。这是由于架桥反应是在分子链处于松缓状态下发生的,新生的架桥反应量不至于引起试料的体积收缩。③架桥反应及分子链切断反应的发生,与试料是否处于伸长状态无关。④架桥结合反应保持其发生反应状态下的平衡,是在该状态下发生形变时新的应力源。Tobolsky 提出的不连续应力松弛测定法概略如下:将未伸长状态试料放置一定温度环境中,一定时间  $t_1$ 。接着将此试料以伸长比  $\alpha$  伸长,测定此时应力,然后迅速将其回复原长。此时,测定的应力是在时间  $t_1$  间隔内,发生的切断反应和架桥反应共同结果,同此状态试料的网状构造相对应。考虑到测定所需时间与  $t_1$  相比十分短,因此,在测定时所产生的切断反应和架桥反应可以忽略。 $t_1$  后,再经过时间  $t_2$ ,再次以伸长比  $\alpha$  拉伸试料,瞬间完成其应力测定,然后,马上释放试料的紧张状态。这样,此次测定是  $t_1+t_2$  时间段内产生的切断反应和架桥反应的结果。根据 Tobolsky 方法的前提条件,如果知道初期网状链分子摩尔数或架桥摩尔数,通过不连续应力松弛曲线和连续应力松弛曲线之差,可以定量新生的架桥摩尔数。

此后, Ore 等提出了不连续应力松弛改良法 (ITMM 法), Baxter、祖父等也提出了不同的解析测定方法。

## 第二节 木材的化学流变学研究现状

### 一、化学应力松弛

青木等用扭转式应力松弛测定装置,测定了温度  $25 \sim 85^\circ\text{C}$ 、浓度  $10\% \sim 70\%$  硫酸水溶液中浸渍过程中日本扁柏 (*Chamaecyparis obtuse* Endl.) 木材的应力松弛。在这个温度和浓度范围内纤维素分子链中葡萄糖甙键 (glucosidic 结合) 容易被切断。20% 硫酸浸渍过程中,无处理材和二甲基甲砜 (DMSO) 膨胀材扭转角  $\theta(t)$  的经时变化结果表明,在  $35^\circ\text{C}$ ,两者  $\theta(t)$  值几乎不变,但在  $75^\circ\text{C}$ ,长时间域出现 DMSO 膨胀材增大现象,其原因是由于 DMSO 使得微晶间隔增大,细胞壁成分容易分解,纤维素的葡萄糖甙键被切断呈优势所致。浓度 0 (水中) 时,扭转角速度和温度之间曲线在  $55 \sim 75^\circ\text{C}$  之间出

现一个极大值。作者认为这与非结晶领域纤维素和半纤维素链的氢键结合被切断产生的分子运动对应(这里称物理松弛。葡萄糖甙键结合被切断时产生的松弛称为化学松弛)。在短时间域物理松弛呈优势,长时间域化学松弛呈优势。物理松弛过程的表现活化能为 99.3 KJ/mol, 松弛时间是硫酸浓度和温度的函数。化学松弛过程的表现活化能为 58.7 KJ/mol, 这个值与扩散占支配地位的活化能相当。从 29%硫酸中日本扁柏木材和 10%硫酸中苧麻纤维(ramie)加水分解过程中的应力松弛曲线比较得知, 日本扁柏木材应力减小缓慢, 且趋近某一平衡值, 而苧麻纤维则单调减少。这是由于由纤维素构成的苧麻纤维的葡萄糖甙键结合被切断, 应力可以完全松弛掉, 而硫酸作用木素产生聚合化效果, 增加了分子间聚集力所致。

青木用间歇法测定了硫酸加水分解过程中木材的应力松弛  $y(t)$  和时间  $t$  的解析式。

$y(t) = -A_1 \exp(-t/t_1) + A_2 \exp(t/t_2) + A_3 \exp(t/t_3)$  式中,  $A_1, A_2, A_3$  和  $t$  ( $t_1 < t_2 < t_3$ ) 都是常数。上式中第 1 项应呈增加趋势, 这主要归属于半纤维素被切断流出, 木材非结晶领域纤维素分子链形成氢键结合。第 2 项应力出现减少, 这与非结晶领域纤维素的葡萄糖甙键切断对应。第 3 项经过平坦区后再度减少, 这表明结晶领域中葡萄糖甙键结合被切断。

此外, 青木还研究了溶液扩散过程中木材的应力松弛, 以及应力松弛与化学反应速度常数之间的关系。

佐藤等认为: ①纤维素结晶和非结晶领域中分子的滑移②镶嵌于 Matrix 之间微纤丝的滑移③细胞间层的细胞相互间的滑移是木材塑性变形的原因。其中①与纤维素、②和③与木素相关。基于此, 佐藤利用纤维素溶剂( $N_2O_4$ -DMSO)和木素溶剂( $SO_2$ -DMSO)处理木材, 测定了处理材在处理液—水—干燥—水过程中的应力松弛, 研究了木材塑性产生的机理。

Wahyu 和王都讨论了热处理过程中压缩木材的应力松弛。

## 二、化学蠕变

木材细胞壁中纤维素分子链之间以氢键结合形成一种架桥式网状构造。青木等用 DEA- $SO_2$ -DMSO 混合液处理日本扁柏木材, 测定了非结晶化过程中木材的扭转蠕变。蠕变柔量  $J(t)$  和温度  $T$  的关系表明, 无处理木材和 DMSO 膨胀材的  $J(t)$  伴随温度上升呈增大趋势, 但非结晶化木材的  $J(t)$  在 65℃以上领域减少。其主要原因是基于 DEA- $SO_2$  络体的分解使得非结晶化部分再结晶化, 以及由于  $SO_2$  的作用使得木素中 C-C 架桥结合的形成, 促进了高分子化所引起的。

将非结晶化木材浸渍在 35℃水中, 以及 DMSO 和 DEA- $SO_2$ -DMSO 溶液中, 从间歇法和连续法测定的扭转角变化比可以看出, 浸渍在 DMSO 和 DEA- $SO_2$ -DMSO 溶液中的非结晶化木材没有出现再结晶现象, 且蠕变单调增大, 但水中却呈 S 型过程曲线; 另一方面, 间歇法测定变形在短时间域急骤减少, 随时间接近某一平衡值。此举动类似于架桥反应生成, 这是基于氢键结合的生成。

师岗淳郎讨论了水蒸气处理过程中木材的蠕变。角谷讨论了脱半纤维素、木素木材的蠕变。Wang 讨论了  $\gamma$  射线辐射杉木压缩木材的蠕变。

## 参考文献

- 1 村上谦吉.高分子の化学レオロジ-(序文).东京:朝仓书店,1968.1
- 2 村上谦吉.高分子の化学レオロジ-.东京:朝仓书店,1968.19~21
- 3 村上谦吉.レオロジ-基础论.东京:产业图书,1993.217~260
- 4 青木务,山田正.木材の非晶化过程および非晶化木材のクリ-ブ.木材学会志,1977,23(1):10~16
- 5 则元京.木材の热および水蒸气处理.木材工业,1994,49(12):588~592
- 6 Wahyu Dwianto, Toshiro Morooka, Misata Norimoto. The compressive stress relaxation of Albizia (*Paraserienthes falcate* Becker) wood by heat treatment. Mokuzaigakkaishi, 1998, 44(6): 403~409
- 7 Wahyu Dwianto, Toshiro Morooka, Yasushi Otsuka, et al. Stress relaxation of Sugi(*Cryptomeria japonica* D. Don) wood in radial compression under high temperature steam. Holzforschung, 1999, 53: 541~546
- 8 Wang Jieying, Zhao Guangjie, Ikuho Iida. Effect of oxidation on heat fixation of compressed wood of China fir. Forestry Studies in China, 2000, 2(1): 73~79
- 9 王洁瑛,赵广杰,杨琴铃等.饱水和气干状态杉木的压缩成型及其永久固定.北京林业大学学报,2000,22(1):72~75
- 10 村上谦吉.レオロジ-基础论.东京:日本产业图书,1993.7~69
- 11 British Rheologists' Club. Classification of rheological properties. Nature, 1942, 149: 702~704
- 12 村上谦吉.高分子の化学レオロジ-.东京:日本朝仓书店,1968.1~2
- 13 Mooney M, Wolstenholme W. E., Villars D. S. Drift and Relaxation of rubber. J Appl Phys, 1944, 15: 324~337
- 14 Tobolsky A. V., Prettyman I. B., Dillon J. H. Stress relaxation of natural and synthetic rubber stocks. J. Appl. Phys, 1944, 15: 380~395
- 15 村上谦吉.エラストマ-のケモレオロジ-(その一).高分子加工,1987,36(1):41~49
- 16 Andrews R D, Tobolsky A V, Hanson E E. The theory of permanent set at elevated temperatures in natural and synthetic rubber vulcanizates. J Appl Phys, 1946, 17: 352~361
- 17 Ore S. A modification of the method of intermittent stress relaxation measurements on Rubber Vulcanizates. J Appl Polymer Sci, 1959, 2: 318~321
- 18 Baxter S, Vodden H A. Stress relaxation of Vulcanized Rubbers( I ) Theoretical study. Polyman, 1963, 4: 145~154
- 19 祖父江宽,村上谦吉,右田哲彦等.化学应力缓和における不连续缓和测定法の再检讨.高分子化学,1964,21:606~612
- 20 青木务,山田正.木材のケモレオロジ-(第1报).木材学会志,1977,23(2):107~113
- 21 櫻田一郎,坂口康义,田中洋子.纤维志,1963,19:346
- 22 青木务,山田正.木材のケモレオロジ-(第2报).木材学会志,1977,23(3):125~130
- 23 青木务,山田正.木材のケモレオロジ-(第3报).木材学会志,1978,24(6):380~384
- 24 青木务,山田正.木材のケモレオロジ-(第4报).木材学会志,1978,24(11):784~789
- 25 佐藤秀次,白石信夫,佐道健等.セルロースおよびリグニン溶剤を用いた木材のセツト.材料,1975,24(264):885~889