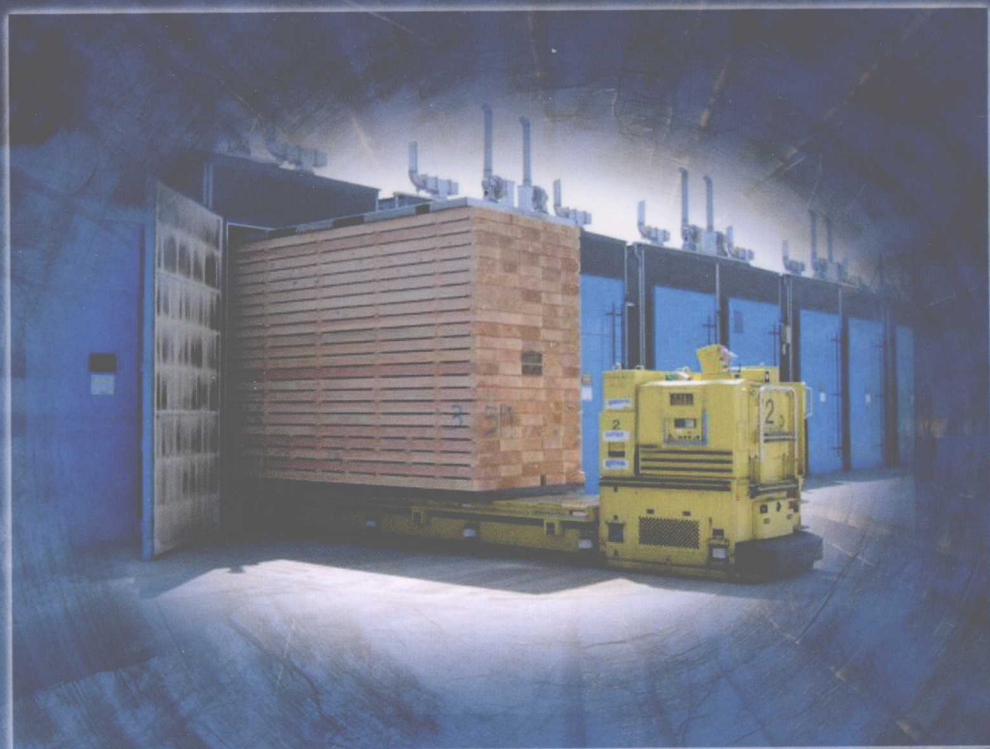


程万里 著
刘一星 审



木材高温高压蒸汽干燥 工艺学原理

 科学出版社
www.sciencep.com

程万里 著
刘一星 审

44 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156 157 158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177 178 179 180 181 182 183 184 185 186 187 188 189 190 191 192 193 194 195 196 197 198 199 200 201 202 203 204 205 206 207 208 209 210 211 212 213 214 215 216 217 218 219 220 221 222 223 224 225 226 227 228 229 230 231 232 233 234 235 236 237 238 239 240 241 242 243 244 245 246 247 248 249 250 251 252 253 254 255 256 257 258 259 260 261 262 263 264 265 266 267 268 269 270 271 272 273 274 275 276 277 278 279 280 281 282 283 284 285 286 287 288 289 290 291 292 293 294 295 296 297 298 299 300 301 302 303 304 305 306 307 308 309 310 311 312 313 314 315 316 317 318 319 320 321 322 323 324 325 326 327 328 329 330 331 332 333 334 335 336 337 338 339 340 341 342 343 344 345 346 347 348 349 350 351 352 353 354 355 356 357 358 359 360 361 362 363 364 365 366 367 368 369 370 371 372 373 374 375 376 377 378 379 380 381 382 383 384 385 386 387 388 389 390 391 392 393 394 395 396 397 398 399 400 401 402 403 404 405 406 407 408 409 410 411 412 413 414 415 416 417 418 419 420 421 422 423 424 425 426 427 428 429 430 431 432 433 434 435 436 437 438 439 440 441 442 443 444 445 446 447 448 449 450 451 452 453 454 455 456 457 458 459 460 461 462 463 464 465 466 467 468 469 470 471 472 473 474 475 476 477 478 479 480 481 482 483 484 485 486 487 488 489 490 491 492 493 494 495 496 497 498 499 500 501 502 503 504 505 506 507 508 509 510 511 512 513 514 515 516 517 518 519 520 521 522 523 524 525 526 527 528 529 530 531 532 533 534 535 536 537 538 539 540 541 542 543 544 545 546 547 548 549 550 551 552 553 554 555 556 557 558 559 560 561 562 563 564 565 566 567 568 569 570 571 572 573 574 575 576 577 578 579 580 581 582 583 584 585 586 587 588 589 590 591 592 593 594 595 596 597 598 599 600 601 602 603 604 605 606 607 608 609 610 611 612 613 614 615 616 617 618 619 620 621 622 623 624 625 626 627 628 629 630 631 632 633 634 635 636 637 638 639 640 641 642 643 644 645 646 647 648 649 650 651 652 653 654 655 656 657 658 659 660 661 662 663 664 665 666 667 668 669 670 671 672 673 674 675 676 677 678 679 680 681 682 683 684 685 686 687 688 689 690 691 692 693 694 695 696 697 698 699 700 701 702 703 704 705 706 707 708 709 710 711 712 713 714 715 716 717 718 719 720 721 722 723 724 725 726 727 728 729 730 731 732 733 734 735 736 737 738 739 740 741 742 743 744 745 746 747 748 749 750 751 752 753 754 755 756 757 758 759 760 761 762 763 764 765 766 767 768 769 770 771 772 773 774 775 776 777 778 779 780 781 782 783 784 785 786 787 788 789 790 791 792 793 794 795 796 797 798 799 800 801 802 803 804 805 806 807 808 809 810 811 812 813 814 815 816 817 818 819 820 821 822 823 824 825 826 827 828 829 830 831 832 833 834 835 836 837 838 839 840 841 842 843 844 845 846 847 848 849 850 851 852 853 854 855 856 857 858 859 860 861 862 863 864 865 866 867 868 869 870 871 872 873 874 875 876 877 878 879 880 881 882 883 884 885 886 887 888 889 890 891 892 893 894 895 896 897 898 899 900 901 902 903 904 905 906 907 908 909 910 911 912 913 914 915 916 917 918 919 920 921 922 923 924 925 926 927 928 929 930 931 932 933 934 935 936 937 938 939 940 941 942 943 944 945 946 947 948 949 950 951 952 953 954 955 956 957 958 959 960 961 962 963 964 965 966 967 968 969 970 971 972 973 974 975 976 977 978 979 980 981 982 983 984 985 986 987 988 989 990 991 992 993 994 995 996 997 998 999 1000 1001 1002 1003 1004 1005 1006 1007 1008 1009 1010 1011 1012 1013 1014 1015 1016 1017 1018 1019 1020 1021 1022 1023 1024 1025 1026 1027 1028 1029 1030 1031 1032 1033 1034 1035 1036 1037 1038 1039 1040 1041 1042 1043 1

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是作者近年来针对木材高温高压蒸汽干燥及其过程中流变学特性等问题,通过与日本京都大学生存圈研究所的合作研究,在完成博士学位论文和国家自然科学基金项目等一系列研究成果基础之上撰写而成的。全书共分为10章,分别从木材与水分、过热蒸汽的性质及应用、木材的高温干燥、高温高压蒸汽干燥过程中木材的收缩应力特征、高温高压蒸汽条件下木材的力学特性及拉伸应力松弛特性、高温高压过热蒸汽处理木材的力学特性及化学成分分析、木材高温区域内的平衡含水率及水分吸附机理等几个方面,以比较翔实的研究数据和结果分析为依据,阐述了木材高温高压蒸汽干燥工艺学原理和相应的科学问题。

本书可供从事木材科学、木材干燥研究和实践的高校及科研院所师生和相关部门的工程技术人员使用与参考。

图书在版编目(CIP)数据

木材高温高压蒸汽干燥工艺学原理 / 程万里著,刘一星审. —北京:科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-019513-5

I. 木… II. 程… III. 木材干燥 IV. S781.71

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 118260 号

责任编辑:周巧龙 王国华 / 责任校对:张小霞

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年8月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2007年8月第一次印刷 印张: 11 1/2

印数: 1—2 000 字数: 219 000

定价: 40.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈明辉〉)

序

近年来,有关木材高温快速干燥的研究受到国内外众多专家学者的青睐,研究者们一直在努力探索一种高温快速、高质量的干燥方法,以期突破制约木材干燥工业发展的瓶颈。

作者在近些年来潜心研究和大量实验的基础之上撰写该书。就木材干燥的前沿课题,利用新开发的耐热、耐压应力传感器和专用夹具,针对木材高温高压蒸汽干燥过程中的收缩应力发生发展特征、应力释放机理以及木材在 100°C 以上高温区域内的平衡含水率及其吸附机理进行了详细、全面的系统研究,为探索内部残余应力小、开裂等缺陷少的高温快速干燥工艺条件提供了可靠的理论基础和科学依据。该书研究主题明确,研究方法先进,内容数据翔实,研究成果具有很高的科学完整性和作为应用基础的成熟性。其标志性创新成果如下:

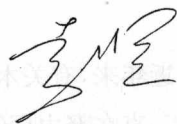
首次设计制作了专用装置,采用应力传感器来直接、实时检测木材高温蒸汽干燥过程中的收缩应力,这和以往通过应变或含水率来间接测量应力的方法或手段相比有创新性的进步,具可操作性和准确性。在此基础之上,首次将木材高温高压蒸汽条件下的流变特性与木材干燥应力理论进行了有机结合,对木材高温高压蒸汽干燥过程中的收缩应力发生发展特征进行了系统、科学的考究;提出了木材高温高压蒸汽干燥过程中应力释放机理研究的新理论和新方法。

通过对高温高压蒸汽条件下木材的力学特性的考察分析,就饱水状态的木材在 100°C 以上的高温条件下,与收缩开裂有直接关系的木材横纹方向的拉伸特性进行了探讨;同时研究分析了高温高压蒸汽条件下,不同应变水平、不同温度以及不同相对湿度条件下的应力松弛特性。

该书还首次探讨了 100°C 以上高温区域内木材的平衡含水率及水分吸附机理,建立了木材平衡含水率与温度和相对湿度之间的数学模型,其研究成果具有重要的科学价值和实践意义。

欣悉此书即将面见读者,我有幸先读为快。在阅读与学习之余,感受着一代孜孜以求的研究者们为木材科学与技术事业的创新发展和崛起而辛勤耕耘的意志和

力量,并感到由衷的欣慰!我对该书作者所取得的成果表示祝贺,同时也希望他以及广大木材科学工作者再接再厉,争取以更好的成绩报效祖国。



2007年3月

前 言

木材干燥是木材加工过程中一项十分重要的工序,是提高木材利用率、节约森林资源的重要途径之一;而木材干燥又是木材加工过程中能耗最大的工序,占总加工能耗的 60%~70%。因此,木材的干燥方法和干燥质量对木材加工成本产生直接影响。随着世界经济的高速发展,木材的需求量日益增大,木材干燥的重要性日益突出,木材干燥任务十分艰巨。

木材干燥方法很多,其中,木材高温干燥一直是木材干燥研究领域的前沿技术,也是木材干燥方法具有标志性的发展趋势。但是,木材在超过 100°C 的高温干燥过程中,被干燥材表面与周围环境之间的蒸汽压差很大、水分蒸发速度快,被干燥材内的水分梯度与常规干燥方法相比变化十分明显,对于含有大量水分状态的木材而言,必将导致较大应力和变形的产生。要解决高温干燥的这些问题,充分掌握木材在高温条件下应力的发生发展特征以及木材在高温区域内的平衡含水率等流变学特性是关键所在。

本书是笔者近年来针对木材高温高压蒸汽干燥及其过程中流变学特性等问题,通过与日本京都大学生存圈研究所的合作研究,在完成博士学位论文和国家自然科学基金项目等一系列研究成果基础之上撰写而成的。该系列研究以日本柳杉木材为研究对象,利用新开发的耐热、耐压应力传感器和专用夹具,在高温高压的水分平衡及非平衡状态条件下,对木材干燥过程中的收缩应力发生发展特征、应力释放机理以及木材在高温高压蒸汽条件下的平衡含水率及其吸附机理进行了较为翔实、全面的系统研究,具体内容包括:①高温高压蒸汽干燥过程中木材的收缩应力特征;②高温高压蒸汽条件下木材的力学特性;③高温高压蒸汽条件下木材的拉伸应力松弛;④高温高压过热蒸汽处理木材的力学特性及构造成分分析;⑤木材高温区域内的平衡含水率及水分吸附机理等。旨在运用该研究结果,为探索开裂、翘曲等缺陷少,内部残余应力小的高温快速干燥工艺条件提供可靠的理论基础和科学依据。该研究结果对于探讨木材高温区域内的物理力学性质、促进木材干燥工业的跨越式发展以及木材的高效利用技术等具有重要意义和实践价值。

本书共分为 10 章,分别从木材与水分、过热蒸汽的性质及应用、木材的高温干燥、高温高压蒸汽干燥过程中木材的收缩应力特征、高温高压蒸汽条件下木材的力学特性及拉伸应力松弛特性、高温高压过热蒸汽处理木材的力学特性及化学成分分析、木材高温区域内的平衡含水率及水分吸附机理等几个方面,以比较翔实的研究数据和结果分析为依据,阐述了木材高温高压蒸汽干燥工艺学原理和相应的科

学问题。

本书的相关研究成果得到国家自然科学基金(30471354)和日本农林水产省“日本柳杉材快速干燥技术”研究课题的资助,同时得到了东北林业大学在读博士创新基金项目的资助,特致谢忱。

导师刘一星教授和日本京都大学師岡淳郎副教授对本书研究内容的选题、技术路线和试验方案的制定以及书稿撰写给予了全面、悉心的指导和深切关怀,东北林业大学李坚教授提出了许多宝贵的意见并为本书作序,在此一并致以最诚挚的谢意。同时,感谢日本京都大学朝田铁平对第9章实验所做的大量工作。感谢所有帮助过我的人们!

本书中引用了大量的国内外相关文献和资料,在此向其作者表示感谢。

限于作者水平,书中疏漏和不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2007年3月

目 录

序

前言

1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 木材干燥的目的和意义	3
1.3 木材的干燥应力	4
1.3.1 木材干燥应力的研究背景	4
1.3.2 国内外关于木材干燥应力的研究现状	5
1.3.3 木材干燥应力测试技术	7
1.3.4 木材干燥应力研究的发展趋势	11
1.4 木材变定的产生及其永久固定	12
1.4.1 木材变定的概念及特征	12
1.4.2 木材变定的产生及回复	13
1.4.3 木材变定的永久固定	14
1.5 关于木材的平衡含水率问题	19
1.6 主要研究内容	20
2 木材与水分	23
2.1 木材中的水分	23
2.2 木材的含水率及测定	24
2.2.1 木材的含水率	24
2.2.2 木材含水率的测定	24
2.2.3 木材干湿程度的分级	25
2.3 木材中水分的存在状态与纤维饱和点	26
2.4 木材的平衡含水率及确定	27
2.4.1 木材的平衡含水率	27
2.4.2 木材平衡含水率的确定	32
2.5 木材的吸湿与解吸	35
2.6 木材中水分的移动	36
2.6.1 木材中水分移动的途径	36
2.6.2 木材中水分移动的机理	37

2.6.3	影响木材水分移动的因子·····	38
2.7	本章小结·····	39
3	过热蒸汽的性质及应用·····	40
3.1	过热蒸汽·····	40
3.2	过热蒸汽的物性和热学特性·····	45
3.3	传热特性·····	47
3.3.1	高温气体的焓·····	47
3.3.2	凝结放热·····	48
3.3.3	对流传热·····	49
3.3.4	热辐射·····	50
3.3.5	全传热速度·····	52
3.4	过热蒸汽处理的特征及其应用·····	52
3.4.1	过热蒸汽处理的特征·····	52
3.4.2	过热蒸汽处理的应用·····	53
3.5	应用上的问题·····	58
3.5.1	过热蒸汽处理对设备性能的要求·····	58
3.5.2	废气的利用途径·····	58
3.6	本章小结·····	59
4	木材的高温干燥·····	60
4.1	湿空气高温干燥·····	60
4.2	过热蒸汽干燥·····	62
4.2.1	常压过热蒸汽干燥·····	63
4.2.2	压力过热蒸汽干燥·····	64
4.3	高温干燥对设备性能的要求·····	66
4.4	高温干燥的优缺点及其适用范围·····	67
4.5	本章小结·····	68
5	高温高压蒸汽干燥过程中木材的收缩应力特征·····	69
5.1	试验材料及方法·····	70
5.1.1	试验材料·····	70
5.1.2	试验装置·····	70
5.1.3	试验方法·····	71
5.2	试验结果与讨论·····	71
5.2.1	木材收缩应力的概观·····	71
5.2.2	径向收缩应力特征·····	79
5.2.3	弦向收缩应力特征·····	84

5.3 本章小结	90
6 高温高压蒸汽条件下木材的力学特性	92
6.1 试验材料及方法	92
6.1.1 试验材料	92
6.1.2 试验装置与方法	93
6.2 试验结果与讨论	94
6.3 本章小结	100
7 高温高压蒸汽条件下木材的拉伸应力松弛	101
7.1 试验材料及方法	102
7.1.1 试验材料	102
7.1.2 试验装置与方法	102
7.2 试验结果与讨论	104
7.2.1 不同应变水平下的应力松弛	104
7.2.2 不同温度条件下的应力松弛	105
7.2.3 不同相对湿度条件下的应力松弛	108
7.3 本章小结	109
8 高温高压过热蒸汽处理木材的力学特性及化学成分分析	111
8.1 高温高压过热蒸汽处理对木材横纹压缩强度的影响	111
8.1.1 试验材料及方法	111
8.1.2 试验结果与讨论	112
8.2 高温高压过热蒸汽处理对木材吸湿解吸特性的影响	115
8.2.1 试验材料及方法	116
8.2.2 试验结果与讨论	116
8.3 高温高压过热蒸汽处理对木材热稳定性的影响	122
8.3.1 试验材料及方法	122
8.3.2 试验结果与讨论	122
8.4 高温高压过热蒸汽处理对木材纤维结晶度的影响	126
8.4.1 试验材料及方法	126
8.4.2 试验结果与讨论	126
8.5 高温高压过热蒸汽处理对木材化学成分的影响	128
8.5.1 试验材料及方法	129
8.5.2 试验结果与讨论	129
8.6 本章小结	131
9 木材高温区域内的平衡含水率及水分吸附机理	133
9.1 木材的水分吸附理论	133

9.1.1	木材水分的吸着	133
9.1.2	研究现状	134
9.1.3	吸附机理	135
9.2	试验材料及方法	143
9.2.1	试验材料	143
9.2.2	试验方法	143
9.3	试验结果与讨论	146
9.3.1	平衡含水率的计算方法	146
9.3.2	平衡含水率的测定结果	149
9.3.3	平衡含水率和相对湿度的关系	150
9.3.4	蒸煮处理对木材水分吸附量的影响	153
9.3.5	水分的吸附机理	156
9.3.6	高温区域内木材含水率与力学性质的关系	160
9.4	本章小结	161
10	结论	163
	参考文献	166

1 绪 论

1.1 研究背景

木材是世界公认的四大材料之一。随着世界经济的高速发展和人口的增加,全球对木材的需求量在不断增长,而木材资源的急剧减少和质量的下降,使得木材供需缺口进一步加大。因此,提高包括低质材、小径材在内的原料的一次加工合格率和综合利用效率显得十分必要。木材干燥是木材加工过程中的一项十分重要的工序,同时也是提高木材利用效率、节约森林资源的重要途径之一,而木材干燥又是木材加工过程中能耗最大的工序,占总加工能耗的 60%~70%。因此,木材的干燥方法和干燥质量对木材加工成本产生直接影响,木材干燥的地位和重要性益显突出。

木材干燥方法很多,就常规干燥而言,由于干燥周期长、能耗大,而特种干燥设备投入高、技术复杂,有时也容易产生干燥缺陷等诸多问题,在很大程度上一直制约着木材干燥工业的跨越式发展。随着世界经济的迅速发展,木材的需求量和干燥量日益扩大,近年来,对高温快速干燥的研究得到了国内外众多专家学者的特别关注,人们开始试图探索一种高温快速、高质量的干燥方法,以期突破制约木材干燥工业发展的瓶颈。其中,由于过热蒸汽干燥法在保证干燥质量要求情况下,可以大大缩短干燥时间,并明显节省能源,将在未来的木材干燥中占据重要地位。

但是,在超过 100℃ 的高温干燥过程中,由于干燥材表面和周围环境空气的蒸汽压差极大,水分蒸发速度快。因此,与通常的干燥方法相比,被干燥材内的水分梯度变得相当大,对于含有大量水分状态的木材而言,必将导致较大应力和变形的产生,这种现象显著地体现了流变学的特征。要解决高温干燥的这些问题,充分掌握木材在高温条件下应力的发生发展以及流变学特性是关键,然而就此方面的研究目前国内尚无人尝试。美国、日本、荷兰和新西兰等国虽然已涉足低高温领域的工艺研究,但木材在高温条件下的力学特性等问题尚不十分明朗。为此,从木质流变学(rheology)的角度出发,充分地考察研究木材在高温干燥过程中应力的发生发展以及应力释放机理、木材在高温区域内的平衡含水率等,有利于探索适合于高温、快速的干燥工艺条件。

近年来,日本京都大学等部门相继研究开发了适于 100℃ 以上的高温高压蒸汽条件下对木材进行力学性能测试的相关技术手段,并在此基础上,就高温饱和

蒸汽条件下木材的应力释放等方面做过大量研究,其结果明显表明了木材屈服点的降低以及应力在短时间内的急剧释放。W. Dwianto、东原贵志等先后对 100~200℃ 高温区域内湿润木材横纹压缩的应力释放进行过测定,其结果表明:当温度达到 120℃ 以上,应力释放经过初期阶段后并未停止,随着时间的增加而继续降低,残余应力(residual stress)趋近于 0。其结果和 100℃ 以下相比,具有显著的应力释放发生,特别是 160℃ 以上,其应力值在短时间内迅速下降至 0。从理论上讲,他们认为这是由构成木材成分的半纤维素和木质素分子链被切断所致,而由此造成的强度并没有很大程度的降低。近年来,随着国内外学者在该方面的大量深入研究,木材在 100℃ 以上高温、润湿状态下的黏弹性特性逐渐变得明朗,利用高温高压蒸汽处理来进行压缩木材的制造、弯曲木变形的永久固定、木质人造板类尺寸稳定性的提高等方面,就变形的永久固定机理的研究十分广泛深入,如软质针叶树材的表面压密化加工、压缩整形木、压缩木、木材横纹压缩大变形的固定等都取得了一定的进展。然而以此作为减少木材干燥过程中所产生的缺陷以及降低干燥应力为目的的研究尚属空白。既然在高温高压蒸汽条件下的应力释放过程中,其残余应力趋近于零,进一步而言,笔者认为,如果利用高温高压蒸汽,在超过 100℃ 的温度区域内对木材进行干燥,那么干燥过程中由于收缩伴随产生的应力,也应有可能在短时间内被有效地减少,甚至被消除。从目前有关荷兰、日本等国学者对 100~150℃ 的高温干燥研究报告来看,并未发生人们所想像的极端缺陷或损伤,而且效果良好。虽然这些都证实了高温干燥适用的可能性,但其理论依据尚有待进一步考察分析。

其次,由于干燥变定(drying set)所导致的暂时固定,通过高温高压蒸汽处理来进行永久性固定,目前在国内外已被得到研究证实,其固定机理被推定为由处理温度的依赖性、分子链被切断所造成的应力释放,分子架桥的形成、纤维素的结晶化以及木质素的软化流动所造成的疏水性凝集构造的形成等。但是如果以此来降低干燥过程中的残余应力,那么,高温高压蒸汽处理所造成木材构造成分的变化、平衡含水率的变化,以及与此相关联的干燥应力释放机理的解析则十分必要。

此外,由于木材的平衡含水率随着周围空气的温度和相对湿度(relative humidity, RH)的改变而变化,而水分和热的作用又与木材物理力学性质的关系十分密切,因此,在研究考察木材与水分的关系时,准确掌握木材的实际水分含量(即含水率)十分重要。对于 100℃ 以下温度区域内,木材的含水率测定相对容易,人们对于 100℃ 以下温度区域内,不同水分状态的木材物理性质也进行了大量的研究考察。但是,对于 100℃ 以上的高温区域,由于湿润木材中的水分在不断地快速蒸发,要保持木材在高温高压条件下的湿润状态,就必须在密闭的耐压容器中不断通入高压饱和蒸汽或过热蒸汽,以保持木材的湿润状态。在此条件下,对于木材含水

率的测定非常困难。因此,在 100℃以上的高温区域,尽管水分对木材物理性质的影响极大,但由于木材高温高压条件下的实际水分含量不详,基于含水率变化对木材物理量影响的考察和评价无法进行。在实际研究过程中,通常以环境相对湿度来代替含水率参数,对木材的物理性质进行考察和评价,但从理论上讲,这种方法十分勉强,在实际使用过程中也容易产生误差。例如,木材在 160℃以上的高温湿润状态下表现出急剧的应力释放,残余应力在短时间内下降到零,在该状态下,通常认为木材的含水率是在纤维饱和点附近,但实际水分含量却并不明确。木材高温干燥过程中,在超过 100℃的区域内,通常也是以环境相对湿度为基准来进行控制,即使木材已经达到干燥状态,实际的含水率数值却并未得知。因此,研究木材高温区域内的平衡含水率及相关性能对于提高木材的使用性能和应用范围,以及木材的深度加工等具有十分重要的现实意义。

为此,本研究拟在高温高压的水分平衡及非平衡状态条件下,对木材干燥过程中的收缩应力发生发展特征、应力释放机理以及木材在高温高压条件下的平衡含水率及其吸附机理进行较为详细、全面的考察分析,旨在有效活用该研究结果,为探索开裂、翘曲等缺陷少,内部残余应力小的高温快速干燥工艺条件提供可靠的理论基础和科学依据,这对于探讨木材,乃至促进木材干燥工业的跨越式发展等均具有十分积极意义,也符合当今世界高温、快速、高质量、低成本的干燥发展总体目标,具有广阔的应用前景。

1.2 木材干燥的目的和意义

木材干燥(wood drying)指在热力作用下,以蒸发或沸腾的汽化方式排除木材中水分的过程。木材干燥的目的和意义在于:

(1) 预防木材腐朽变质和虫害。木材含水率降低到 20%以下,变色菌、腐朽菌几乎不会发生,从而可以避免木材的腐朽、变色以及昆虫的危害。如马尾松在我国南方分布较广,木材密度和强度中等,宜作建筑、车辆、家具等用材。此木材易腐朽、变色和虫蛀,但若干燥到 20%以下的含水率,可以有效地保持木材的固有品质。

(2) 提高木材的尺寸稳定性,防止木材的变形和开裂。将木材含水率干燥到与使用环境相适应的程度,就能防止木材干缩和湿胀,从而有效防止木材的变形和开裂。如我国干旱的西北地区,木材的平衡含水率为 10%左右,木料需相应干燥到 7%~9%的含水率。东南沿海地区,气候潮湿,木材干燥的终含水率应为 12%~13%。东北地区使用及出口到北美洲的木制品,因考虑到室内采暖条件的要求,应干燥到 6%~8%的终含水率。

(3) 提高木材的力学强度,改善木材的物理性能。含水率低于纤维饱和点时,

木材的力学强度随着含水率的降低而增高;另外,经过干燥后的木材,可以改善木材的物理性能,提高胶合质量和涂饰性能,充分显现木材的花纹、光泽和绝缘性能等。木材含水率在纤维饱和点以下,变化 1% 对力学性能的影响变化率如表 1-1 所示。

表 1-1 木材含水率变化 1% 对力学性能的影响

力学性能指标	影响变化率/%	力学性能指标	影响变化率/%
弯曲强度	4	纵向拉伸强度	2
弯曲弹形率	2	横向拉伸强度	1.5
纵压缩强度	6	硬度(横断面)	4
横压缩强度	5.5	硬度(侧面)	2.5
剪切强度	3		

(4) 减轻木材的质量。经过干燥的木材,质量可减轻 30%~50%,能够降低作业成本和减少运输成本。如在林区将原木就近制材,并将锯材干燥到运输含水率(20%),然后外运,会节约大量的运输吨位和运费。同时可防止木材运输途中遭到菌虫危害,保证木材的质量。

总之,木材干燥是合理利用木材、提高利用率、节约森林资源的重要技术措施之一,也是木材加工生产中一项十分重要的工序。A. S. Mujumdar 教授强调指出,在设计干燥装置时,必须考虑较高的干燥质量和较低的能耗。当今干燥的总目标是:在对产品品质不利影响最小,不损害环境和在设备投资与运行费用最低的条件下,实现被干物料最快的水分迁移。木材干燥涉及的行业很多,包括家具、室内装饰、建筑门窗、车辆、造船、纺织、乐器、军工、机械制造、文体用品、玩具等,几乎所有使用的木材都需要进行干燥。木材干燥对于合理、节约利用我国的有限森林资源,保持生态平衡,发展国民经济和现代化建设都具有非常重要的意义。

1.3 木材的干燥应力

1.3.1 木材干燥应力的研究背景

木材在干燥过程中,当含水率降到纤维饱和点以下,就要产生干缩。木材构造上的各向异性,径、弦向的干缩不同,必然会引起木材的应力变形;另外,由于厚度上各层的含水率往往不均匀,木材内外层的干缩不均,也会引起木材的应力变形。其收缩变形一旦受到抑制,将产生较大的收缩应力,引起诸如开裂、皱缩、翘曲等变形以及内部残余应力的产生,从而导致木材在加工、使用过程中的尺寸稳定性降低,产生扭曲、开裂等缺陷。

木材干燥应力(drying stress)是探索木材干燥机理,研究和制定木材合理干燥工艺基准、保证干燥质量的重要参数和依据。因此木材干燥应力的研究是木材干燥工作中的重要课题之一,在木材干燥工作中占有重要地位。自 20 世纪 30 年代以来,国内外众多学者长期致力于该课题的广泛研究,出现了不少关于木材干燥应力的理论和测试方法。由于木材干燥应力是造成木材开裂、翘曲和皱缩的主要原因,通过对干燥应力的研究不但能进一步揭示木材干燥中的物理本质、丰富木材干燥理论,而且可为制定木材工艺干燥基准以及消除木材干燥应力的技术措施提供依据。

木材干燥过程中存在含水率干燥应力,干燥结束后存在残余干燥应力,其应力产生的原因是由于干燥过程中的含水率梯度和木材的各向异性所引起,因此在讨论木材干燥应力的同时,还应考察木材含水率的变化。研究木材干燥的应力变形,就是要研究应力变形产生的原因、发展规律、测定方法和预防措施,从而保证木材干燥质量。

1.3.2 国内外关于木材干燥应力的研究现状

木材干燥应力应变的研究属于木材干燥学中的一项基础研究,自 20 世纪 30 年代以来,经过国内外众多专家学者长期的不懈努力,木材干燥应力的理论和方法得以不断完善和发展。1979 年,日本学者有马孝礼在对木材进行小试样拉伸和弯曲蠕变试验后指出,干燥过程中的蠕变比水分平衡时的蠕变大,干燥温度和干燥速度对蠕变影响大,蠕变的大部分为残余变形。祖父江信夫等用小样拉伸断裂试验方法研究了干燥中木材的断裂韧性系数 K_{IC} 后认为,随着干燥过程的进行, K_{IC} 下降,下降的原因是在干燥中试件表面附近产生的干燥应力使靠近裂纹部分的应力集中增大。1989 年,德本守彦在对山毛榉干燥中的表面硬化和残余变形进行研究后指出,干燥初期木材表层处于拉伸变形状态,内层处于压缩变形状态;并用小样试验进行了拉伸蠕变与干燥速度的相关分析。川井秀一等用黏弹性各向异性应力应变关系描述了木材的流变性质,建立了包括自由干缩率、实际干缩率、非弹性应变三个参数在内的应力函数;并用数值方法研究了含水率梯度与形成干燥应力的关系后指出,干燥应力的大小取决于干燥期间表面含水率梯度对干燥全过程干燥应力的影响。Hsu 和 Tang 根据木材收缩各向异性的原理,提出了基于瓦弯法测定木材干燥应力的数学模型,推导了含水率均匀变化时木材内应力的解析解,并且以此为基础计算了木材截面的变形值。Z. Wang 在利用木材收缩各向异性原理的基础上,采用单边涂层迫使木材产生弯曲的方法研究了预蒸处理对干燥应力的影响。Salin 提出了分析机械吸附蠕变的新模型,并提出在研究干燥应力时应将机械吸附蠕变考虑到模型中。Moren 对 Scots 松进行了木材表面 3mm 厚的薄片应变分析,结果表明,表面薄层分析技术可以成功地分析横纹干燥应力,也表明机械

吸附是引起表面硬化的主要原因;纯黏弹性蠕变对板材表层总蠕变的影响不重要,木材在热湿空气中干燥会产生表面硬化,是由于在干燥初期木材表层产生拉伸变形。干燥过程中表现出来的蠕变与温度水平、应力和含水率变化有关,这种与水分吸附有关的蠕变现象,称为机械吸附蠕变。Rice 在对红栎木干燥初期弹性变形、机械吸附蠕变和黏弹性蠕变变形与含水率和应力水平的关系进行研究后认为,弹性蠕变和黏弹性蠕变很小并且是载荷的函数,机械吸附蠕变是弹性蠕变和黏弹性蠕变的 20 倍,蠕变的大小是含水率的线性函数,并随含水率增加而减少。此外,Q. Wu 用小试样方法,模拟干燥过程对木材的流变行为进行了研究。H. Wang 和 R. Youngs 还从微观的角度研究了木材开裂与干燥应力之间的关系。

我国学者对木材干燥应力的研究也很多。20 世纪 80 年代初,李维拮等在木材弹性分析的基础上,应用热弹性理论推导了干燥应力结构方程和平面应力问题的有限元计算公式,采用切片法测定了木材的弹性应力。在分析干燥初期木材内部的应力和变形后认为,木材在干燥初期主要表现为线弹性材料,干燥初期是木材发生开裂的危险期;到了干燥中期,木材内部的黏性流动已成为变形的主要形式,木材表现为黏弹性材料。周宝华按照前苏联学者乌戈列夫的试验方法,根据在弹性范围内木材的应力与应变成正比的原理,对红松、水曲柳、落叶松和槭木等木材进行了木材在干燥过程中和终了处理过程中全应力及干燥后残余应力的定量研究,初步探索出木材在室干过程中内应力发展和变化的规律。刘应安等于 1991 年提出用圆弧法测定木材的干燥应力,通过测定切片的外层弦长和厚度来计算木材的弹性干燥应力。廖元强提出用应力指数(即试样弯曲变形量)除以弦长测定干燥应力的方法,认为木材干燥过程中一旦表层含水率降到纤维饱和点以下,即横断面上有含水率梯度,则木材断面便存在大小和性质不同的内应力。刁秀明等 1994 年采用切片法对大青杨、白桦和柞木测定了不同干燥温度下干燥应力的变化规律,认为干燥温度越高,产生最大拉伸应变的时间越短,应变值有随温度增高而增大的趋势。常建民在 1997 年针对常规方法不能连续在线测定木材干燥过程中应力发生发展变化规律的问题,根据弹性理论用小试样进行了非接触式探头测量试验片干燥变形,然后用试样的弹性模量来计算木材应力的研究。

综上所述,国内外关于木材干燥应力的研究较为广泛和深入,此处恕不一一赘述。木材在干燥过程中,因水分的减少而引起的体积收缩,称为干缩。木材干缩后尺寸的相对改变量称为干缩率(干缩应变)。由于木材内部各结构单元在干燥过程中不是自由收缩,而是受到外部约束,干缩不能自由进行,即产生干燥应力。木材干燥过程就是含水率变化的过程,含水率场不但是坐标的函数,也是时间的函数,是非稳态过程,因此产生的应力场也是一种随时间变化的应力场。木材在短时