

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2020173

中密度纤维板剖面密度特征参数与 主要物理力学性能相关性

伍艳梅¹, 卢胜高², 赵丽媛¹, 唐召群¹, 杨娜³

(1. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 广西丰林人造板有限公司, 广西南宁 530221;

3. 国家林业和草原局机关服务局, 北京 100714)



摘要: 采用回归分析法, 分析中密度纤维板 (medium density fiberboard, MDF) 剖面密度分布曲线特征参数与吸水厚度膨胀率、内结合强度、静曲强度和表面结合强度之间的相关性。结果表明, 在相同平均密度水平下, MDF表芯层密度比与吸水厚度膨胀率呈极显著负相关关系 ($P < 0.001$)。芯层密度、平均密度与内结合强度分别呈极显著相关性 ($P < 0.001$) 和显著正相关性 ($P < 0.01$), 同时芯层最低密度处不一定是试件破坏位置。受压面、受拉面的峰值密度 (PD) 与静曲强度的关系无显著差异; 陡平型MDF峰面积的减小会导致PD与静曲强度相关性降低, 平均密度与静曲强度呈极显著正相关性 ($P < 0.001$)。铣槽深度处剖面密度与表面结合强度有极显著相关性 ($P < 0.001$)。

关键词: 中密度纤维板; 剖面密度; 表芯层密度比; 峰值密度; 物理力学性能

中图分类号: TS67; TS653.6 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2021) 05-0031-07

Correlation between Characteristic Parameters of Vertical Density Profile and Main Physical and Mechanical Properties of Medium Density Fiberboard

WU Yan-mei¹, LU Sheng-gao², ZHAO Li-yuan¹, TANG Zhao-qun¹, YANG Na³

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Guangxi Fenglin Wooden-based Panels Co., Ltd, Nanning 530221, Guangxi, China;

3. Department of Services, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China)

Abstract: The regression analysis method was used to analyze the relationship between the profile density distribution and thickness swelling rate, internal bond strength, static bending strength, surface bond strength of medium density fiberboard (MDF). The results showed that at the same mean density level, the density ratio of the surface-core layer of MDF has a very significant negative correlation with the thickness swelling rate ($P < 0.001$); the core density and the mean density have extremely significant correlation ($P < 0.001$) and significant positive correlation ($P < 0.01$) with the internal bonding strength respectively. The lowest density point of the core density was not necessarily the failure position of MDF boards. The peak density (PD) of the compression surface and the tension surface has no significant difference impact on the static bending strength. In the steep and flat type of MDF, the decrease of the peak area would weaken the effect of PD on the static bending strength. The static bending strength was

收稿日期: 2020-11-26; 修改日期: 2021-08-04

基金项目: 国家重点研发计划课题“新型与特种木材深加工共性技术标准研究”(2016YFF0201903)。

作者简介: 伍艳梅 (1983—), 女, 工程师。Email: wuyanmeisky@163.com

通讯作者: 唐召群, 男, 高级工程师。Email: tzq@rzbzj.org

extremely significantly affected by the mean density ($P < 0.001$). The profile density at the depth of the milling groove has an extremely significant effect on the surface bonding strength ($P < 0.001$).

Key words: medium density fiberboard; profile density; density ratio of surface-core layer; peak density; physical and mechanical properties

剖面密度分布 (vertical density profile, VDP) 是表征中密度纤维板 (MDF) 等人造板厚度方向上密度变化的重要参数。热压过程中热传导、水分迁移以及木纤维塑化^[1]三者的相互作用, 可使板材密度在厚度方向上呈U形分布, 即表层密度高、而芯层密度低, 被证实既有利于优化吸水厚度膨胀率、内结合强度、静曲强度和弹性模量等物理力学性能^[2-11], 又有利于节约成本。

VDP的形成受热压工艺 (温度、压力、时间、热压板闭合速度) 以及板坯初始含水率等因子的影响, 这些参数的变化使得板坯峰值密度、芯层密度等VDP特征不尽相同^[12-13], 增大了通过VDP特征定量比较或精准预测MDF物理力学性能的难度, 研究结论也存在争议。如: 1) 关于MDF的VDP特征与内结合强度关系, 目前存在两种观点: 一种内结合强度与芯层密度显著线性正相关^[7]; 另一种观点则认为密度存在明显差异的总体样本, 内结合强度与平均密度之间显著相关 ($r=0.81$), 而非芯层密度^[14-15]。2) 吸水厚度膨胀率的主要影响因素是峰值密度^[16]还是表层密度和芯层密度比值 (简称表芯密度比)^[11], 尚未定论。3) 静曲强度与峰值密度显著相关^[6], 由于热压过程中上下压板温度差, 产品上下表面密度分布虽对称, 但各面峰值密度不尽相同, 究竟是受压面还是受拉面的峰值密度决定静曲强度, 尚不明晰; 表芯层密度比的增大使静曲强度增强^[11]或降低^[16]亦存在不同见解。4) 有研究表明铣槽深度是影响表面结合强度的主要因素^[17-18], 但铣槽深度位置剖面密度与表面结合强度的关系研究尚鲜见报道。

本研究主要通过多元回归分析, 针对MDF探究其VDP特征参数与主要物理力学性能的相关性, 为MDF主要物理力学性能测试方法完善提出建议。

1 材料和方法

1.1 试验材料

1) MDF试样: 国内某企业生产的同一批次中

密度纤维板 (商品名砂光镂铣板), 规格为2 440 mm×1 220 mm×15 mm, 主要原料为桉木 (占80%) 和阔叶树材杂木 (占20%), 胶黏剂为三聚氰胺改性脲醛树脂胶, 施胶量为230 kg/m³; 砂光后厚度为15±0.2 mm。随机抽取8张MDF用于测试。

每张板上截取纵向600 mm×500 mm和横向样板500 mm×600 mm各1块, 共16块。从16块样板中分别锯制并筛选出80块24 h吸水厚度膨胀率试件, 120块平均密度相近的静曲强度试件、40块内结合强度试件和32块表面结合强度试件。试验前, 所有试件放置于 (20±2) °C、相对湿度 (65±5) %的环境中调节至质量恒定 (相隔24 h两次称量试件的质量差不超过试件质量的0.1%)。

2) 测试用胶: 热熔胶, 环氧树脂胶 (A/B双组分胶)。双组分胶中, A胶经卡尔费休水分测定法检测含水率25%。

1.2 主要设备及仪器

万能力学试验机, 测量精度为载荷值的0.5%; X射线剖面密度测试仪, 精度1 μm; 恒温恒湿室 (温度精度±0.5 °C)。游标卡尺、千分尺、电子天平。

1.3 试验方法

1.3.1 剖面密度特征参数测定

本研究剖面密度特征参数主要有峰值密度 (peak density, PD)、芯层密度 (core density, CD)、平均密度 (mean density, MD)、表芯密度比。剖面密度沿板厚中心两侧对称分布, 其曲线及特征如图1所示。

图1中显示, PD是指在剖面密度曲线对称的两表面峰值密度的平均值; 芯层是位于板厚度35%以内的中心区域, CD是芯层中最低密度; MD为平均密度; PA为峰面积, 指平均密度以上的波峰部分, 即图1中阴影部分; CL为板厚度中心线; PDI为峰值密度距表面的距离; Pb为峰跨度宽, 指曲线波峰部分与平均密度线交叉点之间直线距离; 表芯密度比为PD与CD比值。

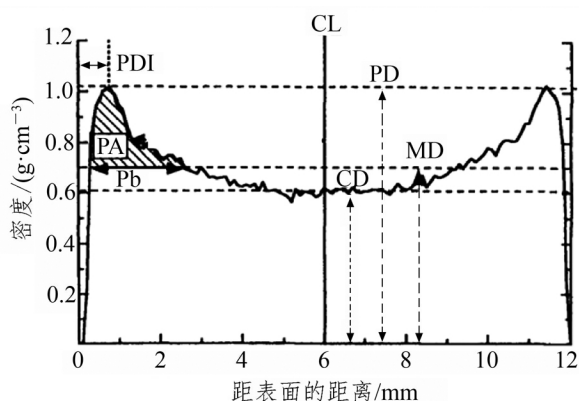
图1 剖面密度曲线及特征^[6]

Fig.1 Density profile and its distribution

使用X射线剖面密度测试仪测试密度分布,测试步长为20 μm 。24 h吸水厚度膨胀率、内结合强度和表面结合强度试件,在厚度方向上的密度分布从靠近上表面开始扫描。静曲强度和弹性模量试件,从检测后的试件随机抽取36块,分别从邻近试件断裂处截取50 mm×50 mm样块各1块,标明受压面,进行剖面密度测试(从靠近受压面一侧开始扫描),分析PD_压、PD_拉、MD与二项性能的关系。

1.3.2 测试方法

分别按GB/T 11718—2009《中密度纤维板》中6.6、6.8、6.7、6.9的规定测试24 h吸水厚度膨胀率、静曲强度和弹性模量(三点弯曲,加载速度10 mm/min)、内结合强度(加载速度2 mm/min)和表面结合强度(加载速度2 mm/min)。考虑人造板含水率对其物理力学性能检测结果的影响^[19-20],所有试件在测试前进行含水率平衡处理,试件在与卡头粘合后至测试前均置于恒温恒湿室存放,避免环境温湿度对检测结果造成影响。

内结合强度:选取5组试件,每组8块,共40块。其中2组试件的CD为(753±3) kg/m³,试件和卡头用热熔胶粘合;3组试件的CD为(783±6) kg/m³,其中1组试件用热熔胶粘合,另2组试件用双组分胶粘合。

表面结合强度:分别制备三种铣槽深度0.2 mm(16块)、0.3 mm(8块)和0.4 mm(8块)的试件。实际铣槽深度应用游标卡尺测量每块试件环形铣槽4个方向上深度,计算算术平均值为准。其中,铣槽深度均为0.2 mm的试件使用热熔胶粘

结试件和卡头,分为A组和B组;铣槽深度为0.3 mm(C组)和0.4 mm(D组)试件使用双组分胶粘结试件和卡头。热熔胶施胶过程需注意控制卡头温度,避免影响检验结果。双组分胶施胶后至测试前需放置4~6 h,以待试件及卡头间胶层完全固化方可进行测试。

1.3.3 数据统计分析

借助SPSS(V18, USA)软件对数据进行了多元线性回归分析及函数拟合。

2 剖面密度分布及其与板材物理力学性能的关系

2.1 剖面密度曲线类型

本研究对象MDF的PD为(1 088.9 ± 12.4) kg/m³, MD为(824.0 ± 7.0) kg/m³, CD为(767.1 ± 6.8) kg/m³, Pb为1~3 mm,芯层密度与平均密度比值约为0.9,表芯密度比约为1.4,具有较高的表层密度和较高CD。

选取本研究中三类特征明显的剖面密度曲线列于图2,结合表芯密度比及VDP曲线梯度特点,判断研究对象为陡平型VDP板材^[13, 16]。依据Pb取值范围及表层和芯层密度比,将三类VDP曲线分为陡平I型、陡平II型、陡平III型。

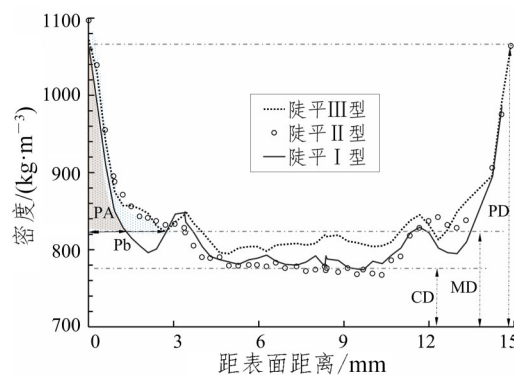


图2 三种MDF剖面密度曲线类型

Fig. 2 Three density profiles of MDF

陡平I型MDF:表芯密度比较大(1.42),且Pb较小(仅1~1.5 mm);

陡平III型MDF:表芯密度比相对较小(1.35),且Pb相对较大(2~3 mm);

陡平II型MDF:介于I型和III型之间,VDP曲线高密度区向低密度区过渡自然,可保证板材的静曲强度和弹性模量指标较好^[21]。

2.2 VDP特征参数与主要物理力学性能的相关性

2.2.1 24 h吸水厚度膨胀率

图3所示,相同MD水平下,PD、CD与吸水厚度膨胀率分别呈极显著线性负、正相关关系,相关系数分别为0.591 ($P<0.001$)和0.553 ($P<0.001$),PD高的相对于PD低的试件表面空隙少,水分进入板材内部渗透阻力增加,吸水厚度膨胀率则降低。即相同MD下,增加PD(降低CD)有利于降低产品的吸水厚度膨胀率。相关研究表明,

陡峭型板材的高密度表面使板材的吸水厚度膨胀率下降;而平坦型板材却因表层密度低,吸水厚度膨胀率较大^[16]。

图3表芯密度比与吸水厚度膨胀率拟合函数关系表明,两者呈极显著线性负相关,相关系数 $r=0.741$ ($P<0.001$),较PD和CD高,这与姜衡^[11]等人研究结论一致。在相同MD水平条件下,增加MDF的表芯密度比,更有助于降低其吸水厚度膨胀率。

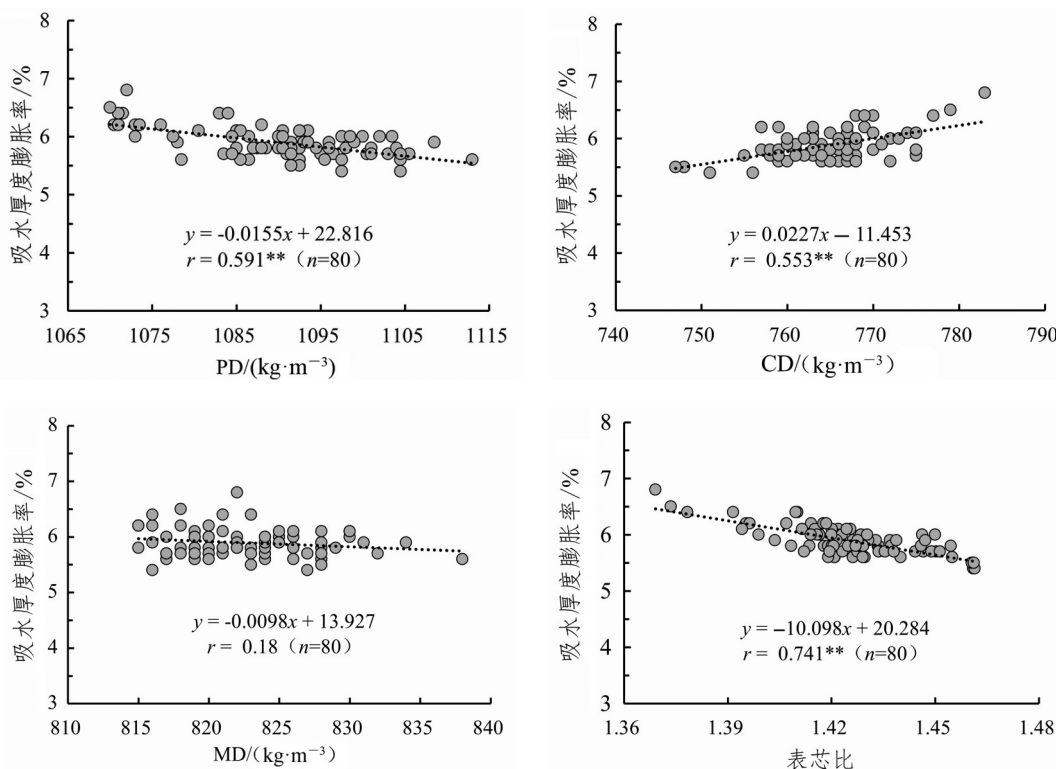


图3 VDP特征参数与24h吸水厚度膨胀率的相关性

Fig. 3 Correlation between VDP characteristic parameters and 24h water absorption thickness swelling rate of MDF

2.2.2 静曲强度和弹性模量

MDF试样受压面、受拉面的PD分别与静曲强度、弹性模量相关性无明显差别。图4显示,受压面PD(PD_压)与静曲强度无相关性,与弹性模量呈显著相关关系($r=0.466$, $P<0.01$)。试验过程中观察到,表芯密度比(1.44)较高的试件,尽管PD达到1100 kg/m³,其静曲强度值却并不高。这与增加表芯密度比可以提高静曲强度和弹性模量^[11]观点相悖,可能由于:1) PA区域较小,削弱了PD对静曲强度和弹性模量的影响;2) PA区域较小,同时受到弯曲和剪切破坏时,易在拉伸或弯

曲破坏前,先发生剪切破坏,导致静曲强度偏低^[6, 16, 22]。同时也存在表芯密度比较小、PD较低,但静曲强度却不低的试件,这是因为在MD较高的水平下,提高CD对于静曲强度有更大的贡献^[2]。

图5表明,本研究MDF的MD与静曲强度和弹性模量均呈极显著线性正相关关系($P<0.001$),相关系数 r 分别为0.597和0.782。PD较MD对静曲强度和弹性模量影响更小,可能由于在相同的MD水平下,拥有高PD的试件VPD特征更易表现为表芯层密度过渡急变,削弱了PD对于静曲强度和弹性模量的贡献率所致^[6, 16, 22]。

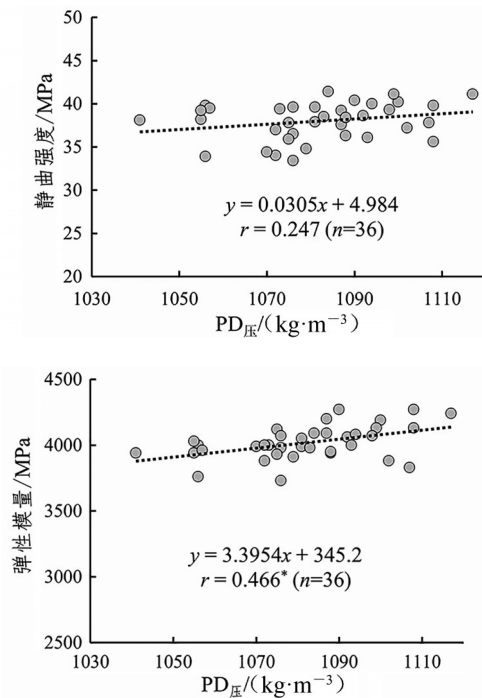


图4 $PD_{压}$ 与静曲强度和弹性模量的相关性
Fig. 4 Correlation between peak density of the compressed surface and static bending strength and elastic modulus

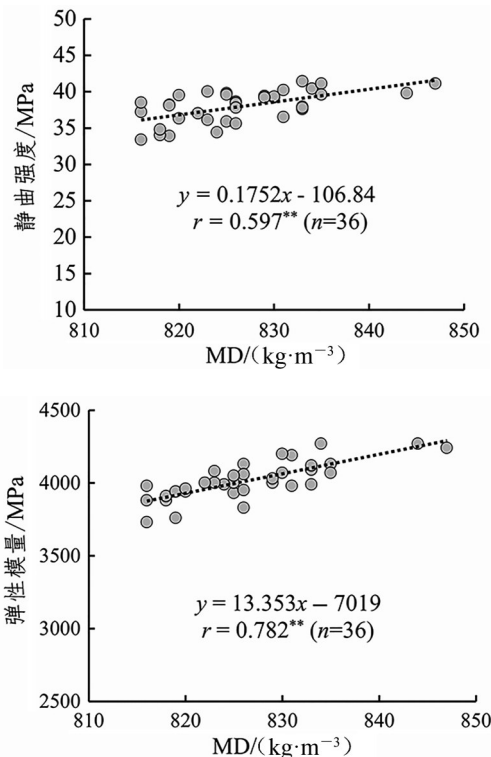


图5 MD与静曲强度和弹性模量的相关性
Fig. 5 Correlation between mean density and static bending strength and elastic modulus

2.2.3 内结合强度

如图6所示,随着CD增大,MDF内结合强度呈现升高趋势。使用双组分胶、热熔胶粘结试件与卡头的情况下,内结合强度与CD分别呈现显著与极显著相关,相关系数分别为 $r = 0.766$ ($P < 0.001$)、 $r = 0.699$ ($P < 0.001$)。比较两种胶粘结试件的内结合强度测试结果发现,使用热熔胶粘结的试件内结合强度值为双组分胶的60%,原因有待进一步分析。同时,以热熔胶试件为例,内结合强度与MD相关系数较CD低,为 $r = 0.601$ ($P < 0.01$),证实内结合强度受CD的影响较MD更显著。

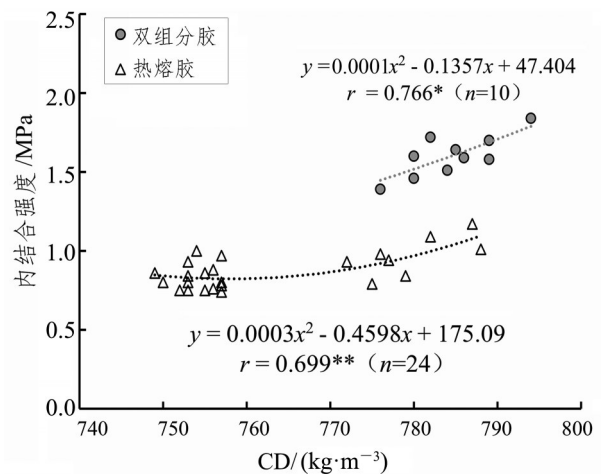


图6 芯层密度CD与内结合强度的相关性
Fig. 6 Correlation between core density and internal bond strength

密度呈现U型分布的板材,其内结合强度试件破坏位置大多数都发生在芯层低密度区域^[23],本研究观察到破坏位置也主要出现在芯层低密度区域,具体在试件厚度的25%、50% (厚度中心)、75%位置处,这与Schulte和Fruhwald^[14,24]研究结论相似。

破坏位置并非芯层密度最低处,主要有三个方面的原因:1)剖面密度反映的是厚度方向上的各层上的平均密度,而破坏初始位置可能只是各层上一个薄弱点;2)破坏位置的表面并不总是与试样表面平行且呈现平面,也会呈现波浪状;3)破坏位置不完全取决于VDP中的最低密度,还受到胶黏剂类型、施胶量、纤维尺寸、树种、压缩率、板坯初始含水率和热压参数^[14, 22, 24, 25]等诸多因素的影响。

2.2.4 表面结合强度

各因素影响下MDF表面结合强度值如表1所示,采用热熔胶时,相同MD水平试件在同一铣槽深度0.22 mm对应的密度分别为1 036、1 029 kg/m³,表面结合强度分别为1.89、1.73 MPa。采用双组分胶时,在铣槽深度0.32、0.45 mm处,分别对应的剖面密度为1 022、946 kg/m³,表面结合强度为1.75、1.37 MPa。可以看出铣槽深度浅者,其对应的密度较高,表面结合强度亦较高。同时,B组和C组铣槽深度变异系数高达17.39%和15.11%,说明铣槽仪的铣槽位置不可控,仪器精准定位功能及稳定性需改进,以减弱对检测结果的影响。

表1 各因素影响下MDF表面结合强度
Tab.1 Effect of various factors on surface bond strength of MDF

测试用胶	分组	MD/(kg/m ³)	铣槽			表面结合强度/MPa
			深度/mm	变异系数/%	剖面密度/(kg/m ³)	
热熔胶	A	829.2	0.22 (0.012)	5.45	1036 (4.72)	1.89 (0.17)
	B	820.2	0.23 (0.040)	17.39	1029 (13.33)	1.73 (0.11)
双组分胶	C	825.8	0.32 (0.048)	15.11	1022 (15.90)	1.75 (0.13)
	D	817.2	0.45 (0.014)	3.11	946 (6.29)	1.37 (0.10)

括号内为标准差。

以热熔胶用胶的总体样本为例,铣槽深度对应的密度与表面结合强度极显著线性正相关关系, $r = 0.795$ ($P < 0.001$) (见图7a)。然而,双组分胶用胶的情况下,当铣槽深度为0.32 mm时,表面结合强度却与铣槽深度处剖面密度呈线性负相关关系 (见图7b)。

分析原因,可能与双组分胶的A胶含量25%有关。试件在施胶后至测试前的4~6 h静置时间段中,胶中水分易浸入试件表面,使纤维与纤维、纤维与胶之间氢键减弱,应力降低,因此可以解释越靠近试件表面的部分虽密度越高,但由于含水率越高,表结合强度反而越低的现象。分析铣槽深度处密度相近试件(B组、C组)表面结合强度检测结果,热熔胶用胶与双组分胶用胶的无显著差异 ($F = 0.176 < F_{0.05} = 4.75$)。

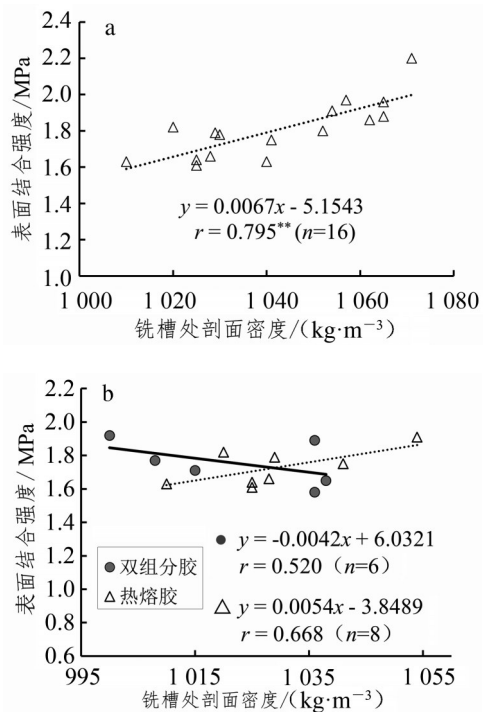


图7 铣槽深度剖面密度与表面结合强度的相关性
Fig. 7 Correlation between profile density at the depth of milling groove on surface bond strength

综上所述,表面结合强度与铣槽位置剖面密度显著相关,测试用胶对表面结合强度检测结果影响不显著,但需注意测试用胶含水率对检测结果造成影响。

3 结论

1) 本研究中,在MD相同水平下,MDF的VDP特征参数与其主要物理力学性能的相关性表现在:

① PD、CD、表芯密度与吸水厚度膨胀率均极显著相关 ($P < 0.001$),但表芯密度比相关性更高;

② PD_压、PD_拉对静曲强度的影响无显著差异,由于PA较小,会削弱PD对静曲强度和弹性模量的影响,而MD与静曲强度和弹性模量呈极显著相关性 ($P < 0.001$);

③ 内结合强度与CD有极显著线性相关性 ($P < 0.001$),与MD显著相关 ($P < 0.01$),但破坏位置不一定是CD所在层;

④ 铣槽深度位置剖面密度与表面结合强度呈极显著相关性 ($P < 0.001$),随着铣槽深度的增加,剖面密度减小,表面结合强度降低。

2) 针对物理力学性能检测方法建议: ① 就表面结合强度而言, 建议国家标准中规定铣槽深度为 0.3 ± 0.05 mm, 以避免铣槽深度偏差对板材, 特别是陡平型板材表面结合强度检测结果的影响; 同时, 呼吁相关部门研制一种可以实现铣槽深度高精度定位的设备, 解决铣槽深度定位不准、稳定性差的问题。② 考虑表面结合强度方法测试用胶含水率对于检测结果的影响, 使用无水分树脂或是快速固化树脂作为测试用胶。

参考文献:

- [1] Biswas D, Kanti Bose S, Mozaffar Hossain M. Physical and mechanical properties of urea formaldehyde-bonded particleboard made from bamboo waste[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011, 31(2): 84-87.
- [2] Wong E D, Zhang M, Wang Q, et al. Formation of the density profile and its effects on the properties of particleboard[J]. Wood Science and Technology, 1999, 33(4): 327-340.
- [3] Bardak S, Nemli G, Sari B, et al. Effects of density profile and hot press diagram on the some technological properties of particleboard composite[J]. High Temperature Materials and Processes, 2011, 30(1/2): 31-37.
- [4] Colosimo B M, Meneses M, Semeraro Q. On the effectiveness of profile monitoring to enhance functional performance of particleboards[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2015, 31(8): 1665-1674.
- [5] Nemli G, Demirel S. Relationship between the density profile and the technological properties of the particleboard composite[J]. Journal of Composite Materials, 2007, 41(15): 1793-1802.
- [6] Wong E D. Effects of Density Profile on the Mechanical Properties of Particleboard and Fiberboard, Wood research: bulletin of the Wood Research Institute Kyoto University, 1999, 86: 19-33.
- [7] 吴跃锋. 刨花板断面密度分布与力学性能相关性研究[J]. 湖南林业科技, 2014, 41(4): 52-54.
- WU Y F. The correlation of vertical density profile and mechanical performance of particle board[J]. Hunan Forestry Science & Technology, 2014, 41(4): 52-54.
- [8] 张扬, 于志明, 黄伟雄. 断面密度分布与中密度纤维板力学性能关系的初步研究[J]. 中国人造板, 2008, 15(10): 8-10.
- ZHANG Y, YU Z M, HUANG W X. Effects of VDP on mechanical properties of MDF[J]. China Wood-Based Panels, 2008, 15(10): 8-10.
- [9] 张扬, 于志明, 马君. 纤维板弹性模量预测模型的研究[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(S1): 127-130.
- ZHANG Y, YU Z M, MA J. Prediction model of modulus of elasticity of fiberboard[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(S1): 127-130.
- [10] 高金贵, 姜兆方, 张健, 等. 压机参数对纤维板地板基材断面密度分布的影响——以双钢带滚毯式连续平压机为例[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2016, 17(1): 123-127.
- GAO J G, JIANG Z F, ZHANG J, et al. Effect of press parameters on density distribution of flooring substrate made of fiber board—taking continuous pressure machine with double steel needle roller belt as example[J]. Journal of Beihua University (Natural Science), 2016, 17(1): 123-127.
- [11] 姜衡, 潘大卫, 张扬, 等. MDI 低密度纤维板制备工艺和性能研究[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(2): 134-139.
- LOU H, PAN D W, ZHANG Y, et al. Preparation process and properties of MDI low density fiberboard[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(2): 134-139.
- [12] 孙维宏, 尹铁元, 高金贵, 等. 纤维及热压主参数对地板基材密度梯度的影响[J]. 木材加工机械, 2018, 29(1): 18-24.
- SUN W H, YIN T Y, GAO J G, et al. Effect of fiber and hot press main parameters on density gradient of floor substrate[J]. Wood Processing Machinery, 2018, 29(1): 18-24.
- [13] 张扬, 于志明. 工艺参数对中密度纤维板断面密度分布的影响[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(4): 118-122.
- Zhang Y, Yu Z M. Effects of hot-pressing parameters on vertical density profile of MDF[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(4): 118-122.
- [14] Schulte M, Frühwald A. Some investigations concerning density profile, internal bond and relating failure position of particleboard[J]. Holz Als Roh- Und Werkstoff, 1996, 54(5): 289-294.
- [15] WANG S Q, Winistorfer P M, Young T M, et al. Step-closing pressing of medium density fiberboard Part 2. Influences on panel performance and layer characteristics[J]. Holz Als Roh- Und Werkstoff, 2001, 59(5): 311-318.
- [16] 张宏健, 赵立. PF-MDF 剖面密度分布特征的研究[J]. 北京林业大学学报, 1991, 13(1): 66-75.
- ZHANG H J, ZHAO L. Density profile resulting from processing variables and quality of PF-MDF[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1991, 13(1): 66-75.
- [17] 李旸, 孔庆媛, 吕斌. 铣槽深度对中密度纤维板表面结合强度测试结果的影响初探[J]. 中国人造板, 2006, 13(5): 18-20.
- LI Y, KONG Q Y, LU B. Influence of the milled groove depth on the testing results of surface bonding strength of MDF[J]. China Wood-Based Panels, 2006, 13(5): 18-20.
- [18] 孔庆媛. 中密度纤维板表面结合强度测试影响因素的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- [19] 高星, 李敏, 甘雪菲, 等. 中密度纤维板含水率对其力学性能的影响[J]. 木材工业, 2017, 31(4): 32-34.
- GAO X, LI M, GAN X F, et al. Effects of Moisture Content on Mechanical Properties of Medium Density Fiberboard[J]. China Wood Industry, 2017, 31(4): 32-34.
- [20] 于海霞, 徐漫平, 方崇荣, 等. 不同温湿度条件对人造板理化性能的影响[J]. 林业科技开发, 2011, 25(1): 86-88.
- YU H X, XU M P, FANG C R, et al. Influence of temperature and relative humidity on physical and mechanical properties of wood-based panels, 2011, 25(1): 86-88.
- [21] 闻文. 多层压机压制中/高密度纤维板剖面密度曲线分析[J]. 中国人造板, 2013, 20(2): 12-15.
- WEN W. Density profile analysis for medium/high-density fiberboard produced by multilayer hot-press[J]. China Wood-Based Panels, 2013, 20(2): 12-15.
- [22] Hunt J F, Leng W, Tajvidi M. Vertical density profile and internal bond strength of wet-formed particleboard bonded with cellulose nanofibrils [EB/OL]. 2017.
- [23] Xu J Y, Widyorini R, Kawai S C. Properties of kenaf core binderless particleboard reinforced with kenaf bast fiber-woven sheets[J]. Journal of Wood Science, 2005, 51(4): 415-420.
- [24] Schulte M, Frühwald A. Shear modulus, internal bond and density profile of medium density fibre board (MDF)[J]. Holz Als Roh- Und Werkstoff, 1996, 54(1): 49-55.

(本文编校 张 鹏、向 琴)