

# 杨木粉尘云与粉尘层最低着火温度研究

崔忠文<sup>1,2</sup>, 周曦禾<sup>1</sup>, 周捍东<sup>1</sup>, 孙勤杰<sup>1</sup>, 刘海良<sup>3</sup>, 李会平<sup>4</sup>

(1. 南京林业大学材料科学与工程学院; 江苏省林业资源高效加工利用协同创新中心, 江苏南京 210037; 2. 大亚人造板集团有限公司, 江苏丹阳 212300; 3. 江苏森茂竹木业有限公司, 江苏宜兴 214231; 4. 邳州市江山木业有限公司, 江苏邳州 221300)

**摘要:** 以杨树集成材生产切屑碎料的木质粉尘为研究对象, 分析粉尘云着火温度和粉尘层着火温度的影响因素。结果表明: 1) 在粉尘云浓度 227~2 273 g/m<sup>3</sup> 范围内, 其着火温度随浓度升高呈先降后增的规律; 在粒径 48~200 μm 范围内, 随粒径增大而提高; 2) 粉尘层着火温度受粉尘含水率和粉尘层厚度的影响较大, 受粒径的影响相对较小。在常规杨树实木加工工况下, 粉尘云和粉尘层最低着火的敏感温度分别是 415 °C 和 260 °C。

**关键词:** 杨木; 木粉; 粉尘云; 粉尘层; 最低着火温度

中图分类号: S792.11; TS653; X932 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654 (2019) 02-0011-05

## Minimum Ignition Temperature of Dust Cloud and Dust Layer of Poplar Wood

CUI Zhong-wen<sup>1,2</sup>, ZHOU Xi-he<sup>1</sup>, ZHOU Han-dong<sup>1</sup>, SUN Qin-jie<sup>1</sup>, LIU Hai-liang<sup>3</sup>, LI Hui-ping<sup>4</sup>

(1. Jiangsu Co-Innovation Center for Efficient Processing and Utilization of Forest Resources; College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 2. Dare Wood Based Panel Group Co., Ltd., Danyang 212300, Jiangsu, China; 3. Jiangsu Senmao Bamboo & Wood Industry Co., Ltd., Yixing 214231, Jiangsu, China; 4. Pizhou Jiangshan Wood Co., Ltd., Pizhou 221300, Jiangsu, China)

**Abstract;** Poplar (*Populus* spp.) wood is widely used in wood processing industry in China. Fire and explosion hazards caused by wood dusts were paid high attention in recent years. Minimum ignition temperature of dust cloud (MITC) and minimum ignition temperature of dust layer (MITL) are two very important factors in production safety. In this study, poplar wood dusts in glulam manufacturing were collected for evaluation of MITC and MITL of the poplar wood.

The results showed that: 1) the MITC decreased first and then increased with increase of dust concentration (from 227 g/m<sup>3</sup> to 2 273 g/m<sup>3</sup>) at 8% of moisture content, and increased with increase of dust particle sizes (from 48 μm to 200 μm). 2) The MITL was affected by moisture content of dust particles and dust layer thickness with little effect by dust particle sizes. 3) the MITC and MITL of poplar wood dusts were 415 °C and 260 °C, separately.

**Key words:** *Poplar deltoids*; wood dust; dust cloud; dust layer; minimum ignition temperature (MIT)

收稿日期: 2018-11-28; 修改日期: 2019-02-25

资助项目: “十三五”国家重点研发计划课题“人造板安全生产与污染减控关键技术”(2016YFD0600703); 江苏省林业资源高效加工利用协同创新中心; 江苏省企业研究生工作站。

作者简介: 崔忠文(1994—), 男, 南京林业大学材料科学与工程学院硕士研究生。

责任作者: 周捍东, 男, 南京林业大学教授。

木粉尘在一定条件下可发生粉尘爆炸, 每年发生在各类木材加工企业的粉尘爆炸事件近百起<sup>[1]</sup>, 且近年来相关事故发生率呈上升趋势, 但原因各不相同<sup>[2]</sup>。在常规生产工况下, 当悬浮在空气中的粉尘云浓度达到其爆炸浓度区间, 并遇到具有足够表面温度的炽热颗粒物或火花时, 粉尘云将发生爆炸的初

始现象(又称为粉尘云着火),并可能形成持续的爆炸;对沉积或附着在具有足够温度的固体热表面上的粉尘,受热时也会发生无焰燃烧或有焰燃烧(称为粉尘层着火),成为粉尘爆炸的点火源。因此,粉尘云最低着火温度(minimum ignition temperature of dust cloud, MITC)和粉尘层最低着火温度(minimum ignition temperature of dust layer, MITL)是粉尘爆炸的重要敏感性参数之一,也是粉尘防爆系统探测单元参数设置的重要依据。准确掌握各种生产工况下不同树种木粉尘的最低着火温度,对于粉尘防爆控制、安全生产意义重大。

木质产品种类繁多,源自于不同树种和切削工艺的木粉尘的化学组分、粒径分布以及含水率等均有较大差异<sup>[3-6]</sup>,表现在爆炸敏感性参数不尽相同。国内外学者的研究发现<sup>[7-13]</sup>,MITC与粉尘粒径、粉尘云质量浓度相关;MITL受粉尘含水率、粒径以及粉尘层堆积厚度等多种因素的影响。已有木质粉尘云或粉尘层最低着火温度的研究,主要针对桑木、松木、云杉、竹材等地域性树种。杨树是我国南方地区木材加工的常用树种之一,但目前对其粉尘的MIT参数尚缺乏较为系统的研究。鉴于此,笔者以美洲黑杨(意杨)木粉为对象,研究其影响MITC和MITL的因素及规律,以期为杨木粉尘防爆探测设施的参数设置,提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试材

杨树(*Poplar deltoids*)木粉取自某集成材生产线锯砂工段吸尘料仓。

### 1.2 装置

BT-1000型粉体综合特性测试仪,ANALYSETTE 3型振动筛分仪,HCP153型恒温恒湿箱,UN30型烘箱,BetterSize 2600干法激光粒度分布仪,MITC-GG型粉尘云最低着火温度测试装置(容积220 mL),MITL-HG型粉尘层最低着火温度测试装置,PE 2400 II元素分析仪,等。

### 1.3 试验方法

首先进行杨木木粉筛分(筛分时间2 min,振幅1.5 mm),分别采用80目(200 μm)、120目(125 μm)、160目(98 μm)、200目(75 μm)和300目(48 μm)

标准筛,制得5种不同筛分规格的木粉试样,再对含水率进行调控。

依据常规工况下木粉的粒度、含水率的水平,采用单因素试验,分别测定粉尘云和粉尘层的最低着火温度。试验设计见表1。

表1 试验因子与水平

Tab.1 Experimental factors and levels

测定指标	变量因子与水平	固定试验条件
粉尘云着火温度	质量浓度/(g·m <sup>-3</sup> ): 227、454、909、1364、 1816、2273	含水率8% 喷粉压力0.05 MPa 木粉粒径≤75 μm
	筛分粒径/μm: 125、98、75、48	含水率8% 喷粉压力0.05 MPa 质量浓度1364 g/m <sup>3</sup>
粉尘层着火温度	含水率/%: 绝干-48	木粉粒径≤200 μm 粉尘层厚度5 mm
	筛分粒径/μm: 200、125、98、75、48	含水率8% 粉尘层厚度5 mm
	粉尘层厚度/mm: 5、12.5、15、17.5、20、27.5、32.5	含水率8% 木粉粒径≤200 μm

## 1.4 测试方法

### 1.4.1 木粉基本特性参数测定

1) 基本物理特性表征 测定5个筛分规格木粉试样的粒径分布,表征中位径、体积平均粒径、比表面积等特征参数。

2) 成分分析 参照GB/T 212-1991《煤的工业分析方法》,采用PE 2400II元素分析仪进行。

### 1.4.2 粉尘云MIT测定

按照GB/T 16429-1996《粉尘云最低着火温度测定方法》<sup>[14]</sup>,将一定质量的木粉装入储粉室(图1),以0.05 MPa压力的压缩空气作为形成粉尘云的分散介质,在G-G炉石英炉管内形成模拟浓度的粉尘云。电阻丝加热石英炉管,炉壁热电偶记录温度。

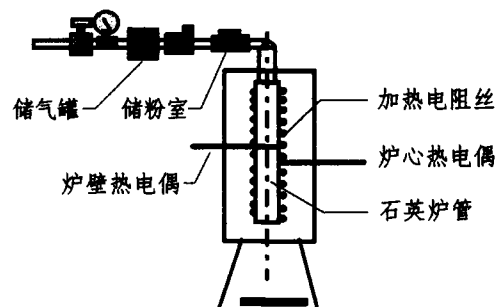


图1 Godbert-Greenwald炉结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of a Godbert-Greenwald oven

按粉尘粒度、浓度进行编组,参考 GB/T 16429, 设定炉温、温度梯度、着火判别的方法与步骤, 分别测定每组粉尘出现着火时的最低炉温温度。

每组试验平行重复 10 次, 取 10 次试验未着火和至少一次着火温度最小值, 即为粉尘云的 MIT。

### 1.4.3 粉尘层 MIT 测定

按照 GB/T 16430-1996《粉尘层最低着火温度测定方法》<sup>[15]</sup>, 选择能引燃粉尘层的着火温度, 将热表面温度调节到预定值, 将一定高度的金属环置于圆形热表面中心处(图 2); 在 2 min 内, 将粉尘由自由堆积状态填满金属环, 沿环口刮平。

按粉尘含水率、粒径和粉层厚度进行编组, 选择一个能可靠引燃粉尘层的着火温度, 作为每组初始试验温度, 并以 10 °C 为梯度, 依次降低热表面的温度, 观察着火情况并记录热板温度和着火延迟时间, 直至粉尘层在 30 min 或更长时间内不发生着火, 即不发生有焰燃烧或无焰燃烧。

按照“最高未着火温度低于最低着火温度不超过 10 °C”规则, 确定每组试验粉尘层的 MIT, 每组的验证试验进行 3 次。

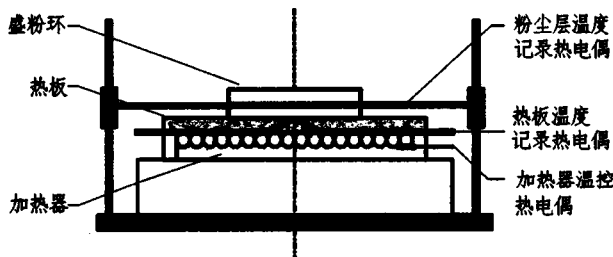


图 2 粉尘层最低着火温度装置结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of minimum ignition temperature test device of dust layer

## 2 结果与分析

### 2.1 杨木木粉基本特性

图 3 是 5 个筛分规格木粉试样(含水率 8%)的粒度分布情况, 表 2 列出木粉颗粒基本几何与堆积特性的特征值; 表 3 列出为木粉试样工业成分与元素分析结果。

表 2 数据表明: 1) 80~300 目杨木木粉的松装堆积密度在 169~254 kg/m<sup>3</sup> 范围; 2) 随着木粉粒径减小, 中位径、体积平均径均相应减小, 比表面积增大。80 目(200 μm) 和 300 目(48 μm) 相比, 筛孔

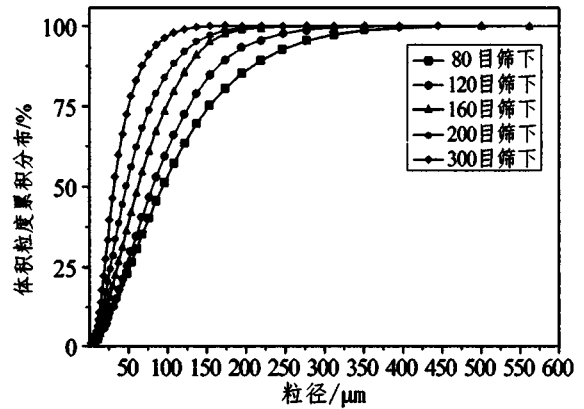


图 3 五个筛分规格的杨木木粉累积粒度分布

Fig.3 Particle size distribution of poplar wood dust samples with five screening specifications

表 2 杨木木粉颗粒几何与松装堆积特性特征值

Tab.2 Eigenvalue of sieving particle sizes and bulk density of poplar wood dust samples

组别	筛目数	筛分粒径/μm	中位径 D50/μm	体积平均径 D[4,3]/μm	比表面积/(m <sup>2</sup> /kg)	松装堆积密度/(kg m <sup>-3</sup> )
1	80	200	94.8	113.5	42.1	169.0
2	120	125	80.3	91.4	46.1	185.5
3	160	98	62.0	70.8	60.2	196.0
4	200	75	47.8	57.7	80.5	216.5
5	300	48	31.6	37.6	103.5	240.0

表 3 杨木木粉工业与元素分析

Tab.3 Industrial and elemental analysis of poplar wood dust samples

工业分析/%			元素分析/%				
灰分	挥发分	固定碳	C	H	N	S	O
0.92	79.24	19.84	49.60	5.81	0.19	0.93	43.47

直径减小 76.0%, 而比表面积增大了 145.7%。在相同含水率条件下, 200、48 μm 木粉的表面积, 比等质量杨木(以密度 400 kg/m<sup>3</sup> 计) 分别增加了 1.8、5.9 倍。比表面积的增大, 将导致水分的分布与移动以及挥发分的析出等性能不同于实体木材。

### 2.2 粉尘云 MIT 的影响因子

#### 2.2.1 粉尘云浓度

图 4 是在湿度 45%、温度 20 °C 的环境条件下, 200 目筛下杨木木粉(含水率 8%) 6 个浓度的粉尘云着火情况及温度的测定结果。

图 4 数据表明: 粉尘云的最低着火温度随浓度的升高呈先快速降低、后小幅升高的二次函数关系, 在浓度 1 816 g/m<sup>3</sup> 时的着火温度最低, 浓度对粉尘云最低着火温度影响所呈现的规律, 与国内外学者对

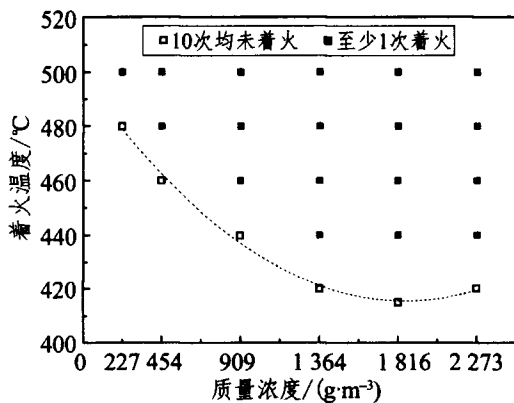


图4 浓度对粉尘云着火温度的影响

Fig.4 Influence of concentration on ignition temperature of dust cloud of poplar wood samples

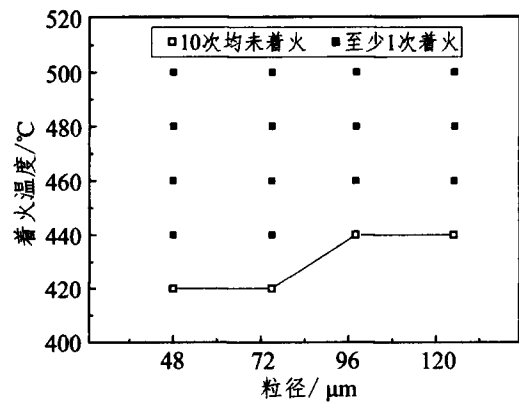


图5 粒径对粉尘云着火温度的影响

Fig.5 Influence of particle sizes on ignition temperature of dust cloud of poplar wood samples

桑木、挪威云杉等树种木粉的研究结论一致<sup>[7,10]</sup>；就树种而言，杨木木粉着火温度值与杂木、速生杨树等混合原材料的纤维板砂光木粉的着火温度（筛分粒径为 63 μm，420 °C）基本一致<sup>[13]</sup>。

杨木木粉云浓度在 227~1 816 g/m<sup>3</sup> 范围内升高时，其 MITC 值快速降低。在 G-G 炉内，粉尘云着火是其爆炸的初始现象，是炉壁面及炉内温度场，与靠近炉壁粉尘颗粒的浓度、粒径等因素达到燃烧条件的耦合结果。

木粉在压缩空气的驱动下，喷射进石英炉管内，由于喷进炉内的气流呈锥状扩散，粉尘颗粒分布并非均匀，且气流的进入也使得炉内的温度场分布不均匀，不同程度地降低了石英管壁温度。因此，即使是着火的粉尘云，也并不是所有颗粒同时着火，而是靠近炉壁某个区域的部分颗粒先被点燃，其后向四周传递释放的能量，诱使炉内周边区域的颗粒燃烧并形成火焰，最终形成整体着火的效应。

粉尘云浓度较低时，颗粒数相对较少，颗粒被点燃相应需要较高的温度；而当浓度高于着火温度敏感的粉尘浓度（1 816 g/m<sup>3</sup>）时，空气中颗粒分布密集，被点燃起火需要更大的能量，故需要更高的炉内温度。

试验时也曾尝试测定更高浓度的粉尘云着火温度，但因测试装置储粉空间有限，未能成功进行。

### 2.2.2 粉尘粒径

图 5 是在木粉含水率 8%、浓度 1 364 g/m<sup>3</sup> 条件下，120、160、200、300 目筛下的 4 种粉尘云的着火情况及温度测定结果。

图 5 结果表明，随着杨木木粉粒径在 48~125 μm 范围增大，相应的 MITC 由 420 °C 升高到 440 °C。这是因为粒径小的粉尘不仅具有较大的表面积和更高的表面活性，有利于热解可燃挥发性气体排出，因而着火温度较低，并随粒径的减小呈线性降低。本试验结果与国内外相关研究结论<sup>[7,10]</sup>一致。

## 2.3 粉尘层 MIT 的影响因子

### 2.3.1 粉尘含水率

图 6 是 200 μm 以下粒径木粉、5 mm 厚粉尘层，分别在绝干和含水率 8%、16%、24%、32%、40%、48% 条件下，其 MITL 值及相应的着火延迟时间。

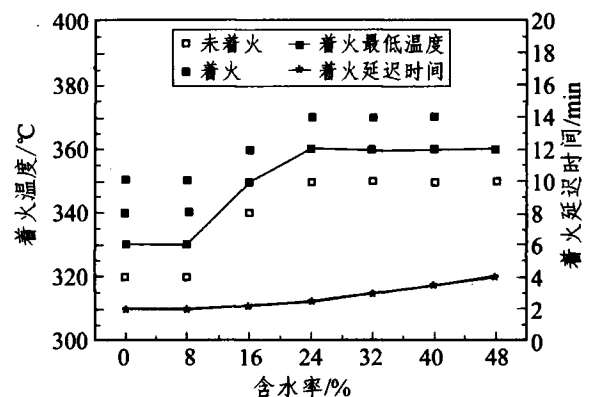


图6 木粉含水率对粉尘层着火温度与着火延迟时间的影响  
Fig.6 Influence of dust moisture content on ignition temperature and ignition delay time of dust layer of poplar wood samples

测定结果显示，含水率小于 8% 和大于 24%，木粉的 MITL 分别稳定在 330 °C 和 360 °C；而在含水率 8%~24% 范围，MITL 快速升高。

粉尘层着火是自下至上表面的热量与水分传

递,并伴随可燃挥发分(质量分数 79.24%)析出的过程,最终发生有焰燃烧或无焰燃烧。在 0~8%低含水率阶段,水分蒸发量消耗热量少,粉层内部及上表面升温快,粉层析出挥发分总体浓度相对较高,并在较短的时间内开始燃烧,在较低的热表面温度下即能着火,MIT 较低;随着含水率在 8%~24%区间增大,粉层升温 and 吸附水的蒸发消耗需更多热量,着火也需要更高的加热板温度,故 MIT 快速升高。

笔者认为,含水率 24%是粉尘层纤维饱和点,因为此时粉层中的水分以吸附水状态存在于粉尘颗粒及颗粒间毛细系统之中。当含水率大于 24%,胞腔内残留自由水,蒸发相对较易,故含水率的继续增大并没有导致着火温度的变化。

### 2.3.2 粉尘粒径

图 7 是杨木木粉含水率 8%、5 mm 厚度粉尘层着火情况及温度。

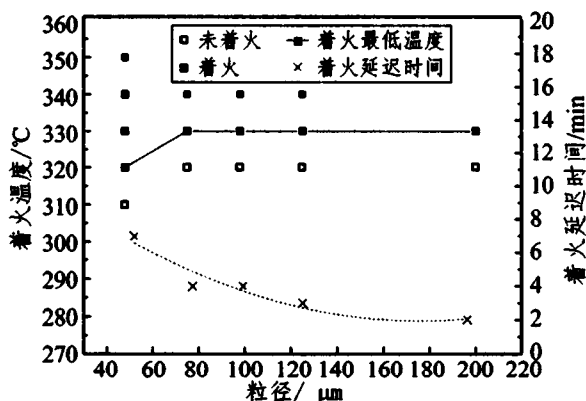


图 7 木粉粒径对粉尘层着火温度与着火延迟时间的影响  
Fig.7 Influence of sieving particle sizes on ignition temperature and ignition delay time of dust layer of poplar wood samples

结果显示,粒径在 48、75  $\mu\text{m}$  的粉尘层,其 MITL 值分别是 320、330  $^{\circ}\text{C}$ ;粒径在 75~200  $\mu\text{m}$  的粉尘层,着火温度稳定在 330  $^{\circ}\text{C}$ ,可见粒径对层状堆积木粉的着火温度没有明显影响。

随着粒径的增大,粉尘层着火延迟时间缩短。这是因为当粉尘粒径较大时,粉尘层填充质量少、密度小,加热板传递给粉尘层的热量,还会通过粉尘层堆积边界以及粉尘层自身而散发部分,导致粒径较大的粉尘层着火温度较高;粒径小的粉尘层质量趋于稳定,密度亦大致相近,加热板传递给粉尘层的热量损失小,故其着火温度低。

### 2.3.3 粉尘层厚度

由图 8 可知,对 80 目筛下、含水率 8%的杨木木粉,当粉尘层厚度由 5 mm 逐步增至 32.5mm,其 MIT 值由 330  $^{\circ}\text{C}$ 降至 260  $^{\circ}\text{C}$ ,并趋于稳定,这是由于粉尘层在被加热的过程,木粉颗粒受热而热解的放热反应所致。随着粉尘层厚度的增大,其着火延迟时间随之呈线性增加。

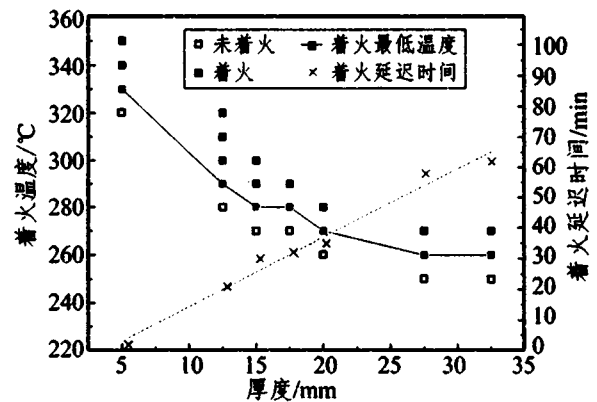


图 8 粉尘层厚度对粉尘层着火温度与着火延迟时间的影响  
Fig.8 Influence of dust layer thickness on ignition temperature and ignition delay time of dust layer of poplar wood samples

## 3 结论

1) 对常规加工工况产生的杨木木粉,粉尘粒径、粉尘云浓度对粉尘云着火温度均有较大的影响。在浓度 227~2 273  $\text{g}/\text{m}^3$  范围,MITC 值以 1 813 $\text{g}/\text{m}^3$  为敏感浓度拐点(对应着火温度为 415  $^{\circ}\text{C}$ ),呈先降低后增加的规律;随着粒径在 48~200  $\mu\text{m}$  范围内增大,MITC 值在 420~440  $^{\circ}\text{C}$  范围内升高。

2) 粉尘层的着火温度受木粉含水率和粉尘层厚度的影响较大。含水率绝干~8%是粉尘层着火的敏感含水率区间,对应 MITL 值为 330  $^{\circ}\text{C}$ 。厚度 5 mm 粉尘层的最低着火温度为 330  $^{\circ}\text{C}$ ,厚度增加至 32.5 mm 时着火温度降低至 260  $^{\circ}\text{C}$ 。粉尘粒径对 MITL 值的影响较小。

3) 对于以意杨实木为原料的加工企业,在常规工艺生产条件下,粉尘云和粉尘层着火的最低着火温度分别是 415  $^{\circ}\text{C}$  和 260  $^{\circ}\text{C}$ ,可供温感型点火源监测设施的温度阈值设置时参考,以防止因炽热颗粒物和高温热表面诱发的粉尘爆炸。

(下转第 24 页)

### 3 结语

实施大规模定制家居柔性制造的优势体现在,充分考虑了企业订单中产品的种类、数量、样式、交货日期等诸多不确定因素,使得企业的生产系统相应具有动态响应能力,同时,以模块化为主的标准化设计体系,以信息交互与管控技术为主的管理方式,不仅仅降低库存成本和风险,更重要的是实现生产过程的柔性化,将定制产品的生产问题,通过产品结构和制造过程的重组,全部或部分地转化为批量生产,又能满足客户的个性化需求,实现个性化和大批量生产的有机结合。

文中提出的柔性制造系统(FMS)理念,对整个大规模定家具企业进行定制化生产具有一定的借鉴作用,但由于家具生产和结构的特殊性,而且FMS涉及的信息集成系统领域和范畴较广,系统研究还处于初级摸索阶段,其组成结构、管理功能及具体实施模式,有待于进一步优化。

### 参考文献:

[1] 杨文嘉. 新工业革命对家具制造业的影响[J]. 家具, 2013, 34(1): 5-7.  
 [2] 熊先青, 刘慧, 朱脚脚, 包瑜亮, 吴智慧. 定制家居产业链协同发展的思考[J]. 木材工业, 2018, 32(2): 18-27.  
 [3] 吴智慧. 工业 4.0 时代家具产业的制造模式[J]. 林产工业, 2016, 43(3): 6-10.  
 [4] 许香穗, 蔡建国. 成组技术(2版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.  
 [5] 熊先青, 赵琳琪, 王承飞, 黄琼涛, 张圣清. 基于成组技术的儿童家具实木零部件标准化设计研究[J]. 林业工程学报, 2018, 3(1): 135-140.

[6] Li R, Cao P, Zhang S, Xu W, Ekevad M, Guo X. Prediction of cutting force during gypsum fiber composite milling process using response surface methodology [J]. Wood and Fiber Science, 2017, 49(4): 453-460.  
 [7] Li R, Guo X, Cao P, Wang X. Optimization of laser cutting parameters for recombinant bamboo based on response surface methodology [J]. Wood Research, 2016, 61(2): 275-285.  
 [8] 熊先青, 吴智慧. 大规模定制家具的发展现状与应用技术 [J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2002, 26(5): 87-92.  
 [9] Xiong Xian-qing, Guo Wei-juan, Fang Lu, Zhang Min, Wu Zhi-hui. Rong Lu, Tetsuo Miyakoshi. Current state and development trend of Chinese furniture industry [J]. Journal of Wood Science, 2017, 64(5): 433-444.  
 [10] Jiamin Wu, Yan Wu, Feng Yang, Caiyun Tang, Qiongtao Huang, Jilei Zhang. Impact of delignification on morphological, optical and mechanical properties of transparent wood [J]. Composites Part A, 2019, 117: 324-331. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.12.004.  
 [11] 熊先青, 郭伟娟, 黄琼涛, 等. 家具数字化制造质量管控技术研究[J]. 林业工程学报, 2017, 2(4): 152-157.  
 [12] 毛磊, 闫超. 面向大规模定制下的家具柔性化制造体系[J]. 林业机械与木工设备, 2015, 43(7): 35-37.  
 [13] 郭伟娟, 熊先青, 唐远明, 庞小仁. 基于 2020 软件的大规模定制衣柜信息交互技术 [J]. 林业工程学报, 2018, 3(2): 153-158.  
 [14] 龙天南, 徐伟, 沈忠民, 吴智慧. 实木橱柜门标准化结构设计研究 [J]. 家具, 2018, 39(6): 11-14.  
 [15] 吴智慧, 朱剑刚. 家具企业实现大规模定制的技术体系 第四讲: 大规模定制的工艺规划体系 [J]. 家具, 2011, 32(4): 111-114.  
 [16] 贾晔, 李军, 丁艳. 基于模糊聚类算法的定制厨柜零件分类制造技术 [J]. 林业工程学报, 2016, 1(3): 133-138.  
 [17] 徐立城, 徐伟, 黄琼涛. 基于人-机作业分析的梳齿榫开榫工序优化研究 [J]. 家具, 2018, 39(6): 6-10.  
 [18] 熊先青, 蔡琦, 吴智慧, 黄琼涛. 大规模定制家具生产线规划与车间管理关键技术的研究[J]. 林产工业, 2013, 40(2): 17-21.  
 [19] 熊先青, 庞小仁, 吴智慧, 黄琼涛. 可视化木家具生产车间全程监控系统的构建[J]. 林业科技开发, 2014, 28(6): 109-113.

(责任编辑 向琴)

(上接第 15 页)

### 参考文献:

[1] 周玉申. 木材加工粉尘治理技术与综合利用研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2006.  
 [2] 周曦禾, 周捍东, 丁涛, 等. 木材加工企业木粉尘燃爆成因剖析及其防控[J]. 林产工业, 2015, 42(11): 49-52.  
 [3] 丁涛, 周捍东, 田爱军. MDF 砂光粉除尘装置滤料阻力的研究[J]. 木材加工机械, 2012, 23(6): 9-11.  
 [4] 邢成, 丁涛, 李智, 等. 基于图像法的刨花板钻孔粉尘尺寸和形态分布研究[J]. 林业工程学报, 2018, 3(1): 21-25.  
 [5] 邢成, 丁涛, 周捍东, 等. 粒度粒形分布特点对板材锯切和油漆砂光粉尘流动性的影响[J]. 林业科学, 2018, 54(12): 142-148.  
 [6] 杨敏杰, 丁涛, 黄山, 等. 秸秆碎料制备作业场所可吸入颗粒物的评估[J]. 木材工业, 2012, 26(4): 29-31.  
 [7] 赵江平, 万抗炜. 桑木粉尘最低着火温度的试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(12): 26-31.

[8] 陈国华, 江湖一佳, 王新华. 红木粉爆炸特性实验研究[J]. 消防科学与技术, 2016(9): 1200-1203.  
 [9] Chin Y S, Darvell L I, Lealantong A, et al. Ignition risks of biomass dust on hot surfaces[J]. Energy & Fuels, 2016, 30(6): 4398-4404.  
 [10] Martinka J, Rantuch P, Balog K. Assessment of the impact of spruce wood particle size and water content on the ignition temperature of dust clouds[J]. Cellulose Chemistry & Technology, 2015, 49(5-6): 549-558.  
 [11] 裴凤娟, 胡双启, 叶亚明. 堆积状态下木粉最低着火温度的实验研究 [J]. 科学技术与工程, 2017, 17(9): 317-320.  
 [12] 张静, 周捍东. 毛竹粉尘云最小着火温度的研究[J]. 木材加工机械, 2018, 29(5): 14-18.  
 [13] 郭露, 王耀, 温作浩, 等. 纤维板砂光粉尘的燃爆特性[J]. 中国粉体技术, 2017, 23(6): 40-46.  
 [14] GB/T 16429-1996, 粉尘云最低着火温度测定方法[S].  
 [15] GB/T 16430-1996, 粉尘层最低着火温度测定方法[S].

(责任编辑 向琴)