

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2020023

中密度纤维板热压排气特征及净化技术分析

丁涛¹, 朱南峰¹, 刘新宇¹, 赵佳锋¹, 王丽²

(1. 南京林业大学, 江苏南京 210037; 2. 大亚人造板集团有限公司, 江苏丹阳 212300)



摘要: 分析中密度纤维板连续式热压工段的排气组分与排放特征, 针对热压排气温度高、两相混合以及线性排放的特点, 介绍以排气收集、冷却、污染物初级分离和深度净化为构成单元的净化系统, 并针对我国MDF板材的用胶特点, 提出排气单级净化的方案建议。

关键词: 中密度纤维板; 热压排气; 粉尘; 甲醛; 净化技术

中图分类号: TS653.6; X383; X72

文献标识码: A

文章编号: 2096-9694 (2021) 01-0059-05

Characteristics and Abatement Technologies of Medium Density Fiberboard Hot-Press Emissions

DING Tao¹, ZHU Nan-feng¹, LIU Xin-yu¹, ZHAO Jia-feng¹, WANG Li²

(1. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China;

2. Dare Wood-based Panels Group Co., Ltd, Danyang 212300, Jiangsu, China)

Abstract: The emissions from medium density fiberboard (MDF) continuous press were analyzed and characterized through linearly emission, high temperature and 2-phase mixture. The abatement system was presented as composing of gas collecting, quenching, primary separation and secondary control units. The single-stage abatement system was suggested for the domestic hot-press system.

Key words: MDF; hot-press emissions; dust; formaldehyde; abatement technology

中密度纤维板 (medium density fiberboard, MDF) 制造过程中, 对大气污染主要集中在3个工段: 纤维干燥、板坯热压和板材砂光^[1]。其中砂光粉尘的治理技术已形成以粉尘收集-回收再利用为一体的治理方案^[2-3]。近年来, 随着国家对环境质量的治理力度加大, 纤维干燥和热压环节的排气治理也得到重视, 特别是纤维干燥工段受到的关注程度较高, 相关的研究与讨论较为活跃^[4-6]。

与纤维干燥排气治理相比, 热压工段排气释放量相对较低, 且排放源空间分布广, 排放物收集难度较大, 相关治理技术的研究和应用有限。目前, 即使在欧洲, 也只有少量MDF热压线配备尾气处理

系统, 且15%~20%的系统仅在连续压机尾端进行局部排气吸集, 而没有顾及压机的其他部位^[7]。我国现有MDF生产线多数未配置压机排气净化系统, 一般仅通过局部排风系统控制车间内污染物浓度, 但排出气体未经任何处理。近年来, 为防止排风管内粉尘粘结产生堵塞, 同时预防高温引发起火或燃爆, 部分生产线在压机排气管道安装水喷淋系统, 并在管路末端配置气液分离装置, 该类系统有助于降低热压排气的有害物排放浓度, 但并未能针对热压排气的特征进行装置参数优化, 运行效果有待提高。

板坯热压是MDF生产中的核心工段, 也是整个生产线中甲醛浓度最高的工段^[8]。其排气处理不仅影响车间环境空气质量, 而且对热压工段的安全生产和产品质量具有重要影响^[9]。笔者通过对MDF连续热压工段排气特征的分析, 探讨排气治理方案, 为企业实现热压工段排气的高效净化治理提供借鉴。

收稿日期: 2020-02-25; 修改日期: 2020-12-30

基金项目: 国家重点研发计划“纤维板生产排气净化关键技术与应用”(2016YFD0600703-3)。

作者简介: 丁涛 (1977—), 男, 副教授, 博士。Email: tao_ding@njfu.edu.cn

1 MDF热压排气特征

中密度纤维板(MDF)的板坯热压温度在200℃左右,压力3~5 MPa,热压过程中的排气是温度和压力共同作用的结果,排气组分取决于MDF原料材种、含水率、胶黏剂与添加剂类型、添加量以及热压工艺参数,主要包括有机挥发物(VOC_s)和粉尘两大类。

1.1 VOC_s排放

MDF板材热压过程中的VOC_s排放主要取决于产品系统所采用的胶黏剂类型。目前大多数MDF采用脲醛树脂(UF)胶,在热压过程中释放的VOC_s主要成分为甲醛,一方面来自UF树脂在配制时加入的甲醛,另一方面来自胶黏剂固化时羟甲基和亚甲基醚键断裂释放的甲醛^[10]。理论上,胶黏剂中的添加剂如石蜡等,也会在高温下挥发,但目前还没有相关试验数据支撑^[7]。有的MDF采用异氰酸酯胶(MDI),在热压过程中的挥发物释放水平显著低于UF胶^[11]。木材自身在高温条件下,也有部分组分挥发产生少量有机酸、醛和萜烯类物质,其中有机酸和醛是半纤维素高温热解产物^[12],萜烯类物质则主要来自木材内部的抽提物。

关于MDF热压排气组分及排放水平的定量研究目前比较有限。有学者对以杨木、松木和杂木为原料制造HDF/MDF的连续平压机的排气成分进行了分析,发现排气中醛酮类化合物主要组分是:甲醛、乙醛、丁醛和丙酮;总挥发性有机化合物(TVOC)主要组分为:甲苯、正己烷和 α -蒎烯,醛酮类物质的排放浓度和排放量都显著高于TVOC^[13]。另有研究表明,甲醛是MDF热压排气的主要挥发物,醛酮类排放量在TVOC中的占比约75%,其次是萜烯类(23%),苯系物和饱和烷烃占比较小^[14]。笔者团队对采用UF胶的连续平压线测试表明,热压线排风管的甲醛浓度为35.9 mg/m³,非甲烷总烃浓度为59.1 mg/m³^[16]。目前我国还没有正式颁布的人造板大气污染物排放标准,但从近年来多地颁布的地方标准来评价,所测排气中非甲烷总烃排放浓度低于北京(DB 11/501-2017)、上海(DB 31/933-2015)和重庆(DB 50/418—2016)等地的大气污染物综合排放标准值,而甲醛排放浓度则高于上述标准规定阈值,是排气中的主要污染物。需要说明的是,即使对于采用相同类型胶黏剂的产品系统,不同热压线的各类排气

浓度水平也会存在很大区别,这是因为排气浓度除了决定于胶黏剂种类外,还取决于产品规格和热压工艺等,因而对特定的生产线,排气特征和相应治理方案都应建立在实地测量的基础上。

1.2 粉尘排放

在MDF压机进口,木质纤维会沿着压机长度方向在蒸汽的带动下逸出压机;此外,在排气处理过程中,板坯中未充分胶合的原料纤维在排气系统的管道抽吸作用下,混入排气中,将增加排气中粉尘的浓度。MDF生产用的木质纤维主要由悬浮性很强的细小颗粒物构成,形态细长,延伸率多在10%~20%,具有较强的黏附性和化学活性,且流动性差,易在排气管道内壁黏附^[15],在湿法净化系统中,是循环水系统发生堵塞的主要原因。因此,无论从环境质量还是从治理工艺的角度,粉尘都是压机排气处理时应着重考虑的问题。

1.3 污染物分布

MDF连续式压机的长度范围通常在20~60 m,沿压机长度方向都有气体排放,在排气吸集时,必须考虑排气的空间分布,这是热压尾气治理的难点。目前主流的设计方案是在压机入口和出口处集中配置吸气罩口、中部辅以少量吸口。图1是应用此方案的MDF连续压机系统,沿压机长度方向,污染物排放浓度的分布示意,图中下层浓度为人体呼吸区高度的污染物浓度,上层浓度为压机顶部污染物浓度;甲醛浓度数据来自笔者团队的现场测量^[16],碳氢化合物浓度来自欧盟委员会数据^[7],两类数据都表现出同样分布规律:即生产排气主要发生在压机中后段。污染物的分布特征与压机的工作原理密切相关,连续式压机从进板到出板,工艺上可分为三段,在压机前段的压力处于最大值,中后段压力相对较低,且温度仍维持在较高水平^[17],因而有机挥发物在中后段的释放量大于前段。

MDF热压线一般在压机部位配有局部排风系统,目前主流的设计方案是在压机入口和出口处集中配置吸气罩口,中部辅以少量吸口。图1所示的排放物浓度分布,反映了现有排风系统的作用与不足。由于排风系统的吸口是沿压机长度方向贴近板坯布置,因而可有效地降低压机下层的排放物浓度,但在压机中后部,局部的甲醛排放浓度超过GBZ 2.1—2019《工业场所有害因素职业接触限值》规定

的甲醛浓度上限 0.5 mg/m^3 。相比而言,压机顶部排气浓度显著高于底部,在大部分区域超出国家标准阈值,表明现有排风系统的作用有限,未被吸尽的排气在高温作用下上浮,导致压机顶部的排气浓度显著高于压机底部。

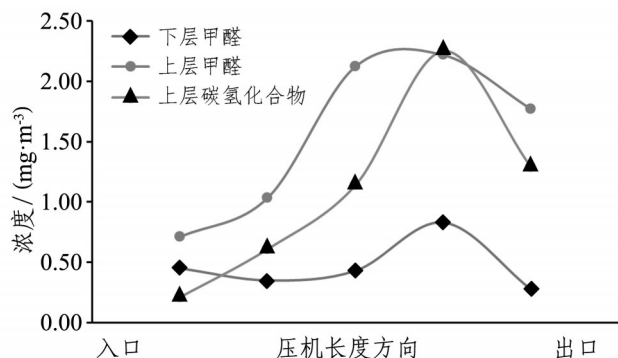


图1 MDF连续压机污染物排放浓度分布

Fig.1 Concentration distribution of pollutants emitted from continuous MDF press

总体而言, MDF热压排气具有温度高、成分复杂、多相混合的特点,其具体成分取决于产品系统所用的木材种类和胶黏剂类型。UF胶是应用最普遍的MDF胶黏剂,在热压过程中的 VOC_s 排放水平也显著高于其他胶黏剂系统,因而甲醛释放应作为MDF热压排气处理关注的重点。热压排气在空间上的分布主要取决于压机的类型与热压参数。对于目前普遍采用的连续式压机而言,随着压机中后段压力的逐渐降低,压机中后部的排放水平要高于压机前部。

2 排气净化方案

上述分析表明, MDF热压排气的特点是高温、多相混合和沿压机长度方向连续排放,一般需采用多单元分级处理系统进行处理。图2是热压排气净化系统的示意图,由排气吸集装置、急冷系统、两级处理单元和循环水处理单元构成,分别对热压排气进行收集、冷却、污染物初级分离和高效分离。由于多数排气净化技术采用湿法分离,因而系统中也包括循环水处理单元,以保持水对排气中 VOC_s 的吸收能力。各地区排放标准存在差异,有的处理系统对排气进行单级处理后可外排,而有的系统则利用生产线的现场条件,将一级处理后的排气导入锅炉燃烧或与纤维干燥炉气相混合。

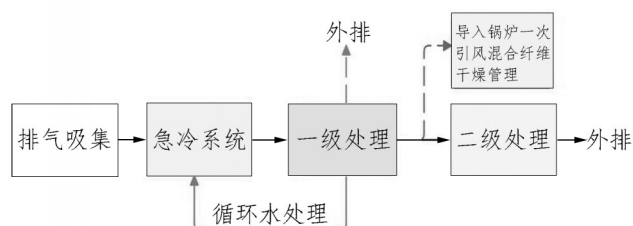


图2 MDF热压排气净化系统示意图

Fig.2 Diagram of the abatement system for MDF hot-press emissions

2.1 排气吸集装置

排气吸集装置由若干布置在热压机部位的吸气罩构成。从图1数据来看,现有局部排气系统的吸口布局和抽吸风量仍有待优化。压机进出口端排放物浓度低,表明现有排风系统的抽吸发挥了作用,有效降低了进出口处的甲醛浓度。但是现有吸口布局在出口处过于集中,造成压机出入口处排气浓度水平虽然达标,但在中后部局部区域仍然超标,吸口的数量和位置还需要进一步优化。一方面通过适当增加抽吸风量,减少吸口处的排气外逸,降低压机顶部排气浓度;另一方面优化吸口位置,将中后部进行整体考虑,而不仅仅考虑出口部位。

2.2 急冷系统

多数压机排气净化系统在管道吸口后端设置排气急冷系统,通过沿管道设置的水喷淋装置对排气进行冷却。通过急冷系统的降温,排气的体积可显著缩小,使下游净化装置的体积减小,系统可以配备较小型号的风机,同时可以防止排气在高温下燃烧,提高生产安全。对于采用湿式喷淋净化装置的系统,急冷系统还可以防止高温导致的喷淋水气化,保障喷淋装置的正常工作。喷嘴型号和尺寸的选择是急冷系统设计的关键,通过喷淋角度、压力和液滴尺寸的合理设计,将排气温度控制在合理的水平。

2.3 净化装置

净化装置是排气净化系统的核心组分,装备的类型和数量是根据MDF生产原料、工艺特点和各地区大气排放标准来灵活设定的。排气净化装置的类型有很多,其中湿式净化装置应用最为普遍。

2.3.1 湿式装置

湿式分离装置采用喷淋液,以惯性碰撞和吸收的机理,分别去除排气中的粉尘和气态成分。在热压排气净化系统中常用3种湿式净化装置。1) 湿式

旋风分离器,对粉尘和气态污染物的净化能力都较为有限,因而一般需要加装二级净化装置,以进一步提高排气净化能力;2)文丘里除尘器,是一种高效湿式除尘效率,除尘效率可以达到99%^[18],但是只能分离VOC_s中的水溶性组分,如甲醛、甲醇等,且能耗较高;3)湿式静电除尘器,具有液体喷淋和高压静电场两个分离单元,分别通过碰撞吸收和电场力两个机理净化排气,对排气中的粉尘分离效率很高,也可以吸收水溶性气体,分离排气VOC_s中的凝结性组分。如果MDF生产线的纤维干燥排气采用湿式静电处理,则热压排气可与之共用一套系统。文丘里除尘器和湿式静电除尘器均可以单独用于压机尾气的处理,但如果对VOC_s的排放标准较为严格,则需要在下游安装一个专门的VOC_s分离二级净化装置,如生物过滤器(表1)。

表1 MDF热压排气净化系统配置及性能特点

Tab.1 Configuration and performance of MDF hot-press emission abatement systems

急冷系统	一级净化	二级净化	净化效率/%	
			粉尘	VOC _s
有	湿式旋风分离器	湿式静电	>90	对水溶性和凝结性组分净化效率高
		生物过滤器	>80	>90
	湿式静电除尘器	生物过滤器	>90	>90
	文丘里除尘器	生物过滤器	>95	>90
无	热力氧化		>95	>95
	袋式除尘器	生物过滤器	>95	>90

生物过滤器通过微生物将排气中的有机污染物降解成CO₂、水和其他毒性较弱的副产物。生物法对VOCs净化效率可达90%^[19-20],运行和维护成本较低。一般采用生物滴滤塔和填料塔形式,前者需要将VOC_s溶于水后进行生物降解处理,主要处理排气中的亲水性成分,如醇、醛、弱酸和低分子量的碳氢化合物;后者则通过增湿创造有利于微生物生长的条件,主要处理疏水性成分,如 α -萜烯、萜烯和高分子量的碳氢化合物。

2.3.2 干法装置

有一些压机排气净化系统没有在管道里对排气进行喷淋冷却,而是采用袋式除尘器等干法除尘装置进行粉尘分离,但是袋式除尘器对VOC_s没有净化能力,因而在下游必须安装气体净化装置。此外,由于排气温度较高,根据笔者团队的现场监测,在江浙地区的冬季气温条件下,除尘器入口温度仍有

80℃左右,对布袋除尘器造成较大安全隐患。与之相比,热力氧化法则可单级完成对粉尘和VOC_s的高效处理,通过热力燃烧氧化分解生产排气中的粉尘和有机挥发物。常用的燃烧装置有蓄热式焚烧炉(RTO)和催化焚烧炉(RCO)两种,这两种方案可以通换热器,将焚烧炉排气端的热量进行回收,对进气端的气体进行预热以显著降低系统的热量消耗,热回收率可达98%。对定向刨花板热压排气的处理表明,该方案对VOC_s的净化效率达95%^[21],但投资和运行成本都较高,目前只在欧美国家有限应用。

2.4 系统配置与建议

表1归纳了上述排气净化装置的常用配置和性能特点,净化效率是安装了两级净化装置后的系统性能。总体来说,干法净化系统由于安全(袋式除尘器)或成本(热力氧化)问题,适用性不如湿法系统。常用湿法单级净化(一级净化)系统对VOC_s的净化能力普遍较弱。两级净化(一级加二级净化)系统通过对粉尘和VOC_s分别设置独立处理单元可以达到更好的处理效果,但增加了投资和维护成本。在生产场地和工艺条件允许的情况下,可以将单级处理后的排气与纤维干燥管道的进口热气相混合或通入锅炉中进行氧化分解,这样可以显著节约投资成本。在通入锅炉时,需考虑风量与锅炉一次引风量的匹配性,排风量应比一次引风量小20%~30%^[22]。通入干燥管道时,需经过急冷系统或湿式分离装置的冷却,以防火灾风险。

我国MDF生产主要采用UF胶,其热压排气中VOC_s以水溶性甲醛为主,非甲烷总烃的排放浓度相对较低,针对此排放特点,对单级净化装置的类型和参数进行优化,同时兼顾排气中的粉尘排放,保障排放达标和循环水系统的正常运行,以达到排气治理要求。在上述各类湿式净化装置中,湿式静电除尘器可以较好地满足上述要求。此外,湍球塔也是一种很有应用前景的热压排气净化装置。

湍球塔由填料塔发展而来。填料塔通过内置的填料增大排气与喷淋液的接触面积和时间,以提高净化效率,但由于热压排气中含有较高浓度的粉尘,易造成填料堵塞,无法用于含尘气体的净化处理。湍球塔以聚乙烯或聚丙烯空心小球为移动填料替代固定式填料,保留了填料塔的良好吸收性能,持续运动的填料一方面增强了气液的混合,另一方面对

填料表面的粉尘颗粒起到清洁作用,可有效解决粉尘的堵塞问题。为了让填料处于持续运动状态,湍球塔内的气流速度高于一般湿式净化装置,一般在2~5 m/s范围,意味着在相同尺寸情况下,湍球塔的处理气量可达填料塔的5~6倍^[18]。但是由于湍球塔内气流速度较高,喷淋液易被气流带走从排气口排出,需要在塔内安装高效除雾器。因此,针对MDF热压排气特征,还需要对湍球塔的结构与运行参数进行针对性的设计与优化,以获得良好的应用效果。

3 结语

MDF生产过程中热压尾气的治理对车间环境与生产安全都至关重要。热压排气具有高温、多相混合以及非点源排放的特点,正是对其进行有效吸集和处理的难点。一个完整的热压排气系统一般包括排气吸集、急冷系统和两级净化装置,分别用于气体的收集、冷却、污染物预分离和深度净化。

针对我国MDF用胶特点,可以通过结构和参数优化在一级处理装置中整合除尘和有机气体的净化功能,实现高效经济的热压排气处理,湍球塔是其中应用前景较好的一种净化装置类型。

参考文献:

- [1] Mazumder M. Aerodynamic properties and respiratory and deposition characteristics of formaldehyde impregnated medium-density fiberboard particles [J]. Particulate Science and Technology, 1997, 15(1): 37-49.
- [2] 吴剑. 砂光粉在中(高)密度纤维板企业的效用[J]. 能源研究与管理, 2012(2):13-14, 43.
WU J. Effectiveness of wood dust in the middle/high density fiberboard companies[J]. Energy Research and Management, 2012(2):13-14, 43.
- [3] 黄武立. 中密度纤维板砂光粉尘回用筛选系统改造探讨[J]. 中国人造板, 2017, 24(9): 17-18.
HUANG W L. Reconstruction of sand dust recovery system in medium density fiberboard[J]. China Wood-based Panels, 2017, 24(9): 17-18.
- [4] 陈朝华. 中密度纤维板生产线干燥旋风分离器排放尾气水幕喷淋除尘刍议[J]. 中国人造板, 2017, 24(6): 12-15, 28.
CHEN C H. Application of water curtain dedusting system in dryer cyclone to purify exhaust gas emission in MDF production line[J]. China Wood-based Panels, 2017, 24(6): 12-15, 28.
- [5] 黄山, 周培国, 卢志刚, 等. 松木、杨木纤维干燥排气总挥发性有机物与醛酮的排放特征[J]. 木材工业, 2012, 26(6): 17-21.
HUANG S, ZHOU P G, LU Z G, et al. Analysis of chemical emissions from a medium density fiberboard plant[J]. China Wood Industry, 2012, 26(6): 17-21.
- [6] 蔡剑峰. 浅议中密度纤维板干燥废气生物净化处理设备和控制系统[J]. 中国人造板, 2018, 25(3): 15-20.
CAI J F. Discussion on control system of equipment for biological gas cleaning in dry waste gas of MDF production line[J]. China Wood-based Panels, 2018, 25(3): 15-20.
- [7] Stubdrup K, Karlis P, Roudier S, et al. Best available techniques (BAT) reference document for the production of wood-based panels. Industrial emissions directive 2010/75/EU[R]. Seville: European IPPC Bureau, 2016.
- [8] Lavoue J, Beaudry C, Goyer N, et al. Investigation of determinants of past and current exposures to formaldehyde in the reconstituted wood panel industry in Quebec [J]. The Annals of Occupational Hygiene, 2015, 49(7): 587-602.
- [9] 闻文. 中/高密度纤维板热压排气过程的研究分析[J]. 中国人造板, 2015(5): 11-13.
WEN W. Hot-pressing exhaust process of medium/high-density fiberboard[J]. China Wood-based Panels, 2015(5): 11-13.
- [10] 李建军, 胡志军, 徐明, 等. 纤维板工业挥发性有机物排放特征及防治措施[J]. 纤维素科学与技术, 2017, 25(1): 58-64.
LI J J, HU Z J, XU M, et al. Emission characteristics and control measures of volatile organic compounds from fiberboard industry[J]. Journal of Cellulose Science and Technology, 2017, 25(1): 58-64.
- [11] Vangronsveld E, Berckmans S, Verbinen K. Isocyanate and total inhalable particulate air measurements in the European wood panel industry[J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2010, 213: 475-488.
- [12] 顾炼百, 丁涛, 江宁. 木材热处理研究及产业化进展[J]. 林业工程学报, 2019, 4(4): 1-11.
GU L B, DING T, JIANG N. Development of wood heat treatment research and industrialization[J]. China Forestry Science and Technology, 2019, 4(4): 1-11.
- [13] 张培培, 周捍东, 卢志刚, 等. 连续压机排气TVOC和醛酮排放特征研究[J]. 林产工业, 2013, 40(6): 17-20.
ZHANG P P, ZHOU H D, LU Z G, et al. The characteristics of TVOC, aldehyde and ketone emissions from continuous hot-press[J]. China Forest Products Industry, 2013, 40(6): 17-20.
- [14] WANG Y L, LU Z G, ZHANG P P, et al. Characteristics of TVOC, aldehydes and ketones emitted from fiber hot-pressing in manufacturing of MDF made from poplar and pine[J]. C. Key Engineering Materials, 2013, 567: 9-13.
- [15] 刘新宇, 李智, 丁涛, 等. MDF纤维尺寸形态分布特点对流动性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(12): 129-133.
LIU X Y, LI Z, DING T, et al. Influence of size and shape distribution on flowability of medium density fiberboard fibers[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(12): 129-133.
- [16] 刘新宇. 纤维板热压排气特征及净化技术研究[D]. 南京: 南京林业大学硕士研究生论文, 2019.
- [17] 张洋. 纤维板制造学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2012.
- [18] Joseph G, Beachler D. Scrubber systems operation review, self-instructional manual (2nd edition) [M]. Raleigh: North Carolina State University, 1998: 6-7.
- [19] Santos S, Jones K, Abdul R, et al. Treatment of wet process hardboard plant VOC emissions by a pilot scale biological system[J]. Biochemical Engineering Journal, 2007, 37(3): 261-270.
- [20] Karre A, Jones K, Boswell J, et al. Evaluation of VOC emissions control and opacity removal using a biological sequential treatment system for forest products applications [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2012, 87: 797-805.
- [21] US EPA. Emission Factor Documentation for AP-42, Section 10.6.3, Medium Density Fiberboard Manufacturing, Final Report[R]. Washington DC: US EPA, 1998: 2-5.
- [22] 周捍东, 丁涛, 林钟新, 等. 欧洲纤维与刨花板干燥及热压排气污染治理技术[J]. 木材工业, 2016, 30(2): 33-36.
ZHOU H D, DING T, LIN Z X, et al. Controlling emissions from fiber/particle drying and hot pressing of wood-based panels in Europe[J]. China Wood Industry, 2016, 30(2): 33-36.

(本文编校 向琴)