

模拟火灾环境下密封容器内 木材的热解试验

周本权, 李明海, 陈均, 马红, 胡绍全

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川绵阳 621900)

摘要: 利用燃烧室模拟火灾环境,研究密封容器内木材的热解炭化及内部温度分布。结果表明,密封容器内木材的热解炭化发生在表层,内部大部分区域仍为原木;炭化层的厚度受温度影响分布不均,并沿表面缺陷、纹理方向收缩,产生大量缝隙,为热解产生的高温高压气体向内扩散创造了条件,对木材内部热解炭化及温度分布产生显著的影响。

关键词: 火灾; 密封容器; 木材热解

中图分类号: TS6; TQ351.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-8654(2009)06-0011-03

Wood Pyrolysis in a Sealed Vessel Exposed to Fire

ZHOU Ben-quan, LI Ming-hai, CHENG Jun, MA Hong, HU Shao-quan

(China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: The authors observed temperature distribution in wood during pyrolysis in a sealed chamber while exposed to fire. They found that: 1) pyrogeneration and carbonization primarily occurred on the wood surface; 2) the carbonized layer had asymmetrical thickness due to variations in the wood temperature; 3) the carbonized layer shrank along the grain and along defects in the wood resulting in many gaps. This helped to increase and diffuse the temperature and gas pressure in the wood causing a significant influence on internal wood pyrolysis and temperature distribution.

Key words: fire; sealed vessel; wood pyrolysis

火灾是人类生产生活中危害性最大的灾害之一,特别是在含有炸药、放射性物质等危险品的贮存和运输过程中,火灾的发生会造成重大的经济损失和环境污染。国内外对此进行的大量研究^[1-2],广泛采用钢-木-钢结构,作为危险品贮运的抗事故包装箱。利用木材导热系数低、在高温下吸热热解的特点,将其填充在内外钢壳之间的密封区域内作为缓冲隔热层,降低外界以导热方式传入包装箱内部的热量,提高危险品在火灾环境下的安全性。研

究密封容器内木材热解炭化规律,对抗事故包装箱的设计及其在火灾条件下的安全评估,具有十分重要的意义。

目前,国内外对于木材热解的研究,主要是对粉末状样品的热重分析,求取木材热解、炭化的化学动力学反应参数^[3-4],或在开放空间内采用小尺寸木材样品,对其在开放空间内,外加辐射热源下的起火及燃烧,进行试验及数值的模拟研究^[5],对于密封容器内大规格木材的热解炭化鲜有提及。密封容器内木材热解、炭化与开放空间内木材着火燃烧相比有着鲜明的特点:一是木材不直接与火焰接触,发生热解炭化及收缩后,其在容器内的状态发生改变;二是木材热解炭化过程中,产生大量的气体(CO和水蒸气等),在高温、密封环境下会产生较高的压力,使容器

收稿日期: 2009-02-10; 修改稿: 2009-04-29

基金项目: 国家自然科学基金, NASF 联合基金重点项目(10776100)。

作者简介: 周本权(1976—),男,中国工程物理研究院总体工程研究所工程师。

内部环境发生变化。这均会对木材的热解炭化过程产生影响,因此,笔者通过燃烧室模拟火灾环境,选用杉木为试材,研究在外部火灾条件下,密封容器内木材的温度分布,以及木材热解炭化规律,为容器的设计及其内部木材热解数值模型的建立提供依据。

1 试验条件

1.1 试验装置

密封容器为圆柱状结构,共 2 件。1# 容器为直径 340 mm,高 400 mm;2# 容器为直径 500 mm,高 600 mm;侧壁均为 5 mm 厚的钢壳。容器内放置含水率为 12% 左右的圆盘状杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 试件,其外径分别为 330 和 490 mm,厚度分别为 95 和 145 mm;中心部位加工有直径为 90 mm 的孔,用于无封钢管支撑和定位。容器内共放置 4 层杉木,从容器底部往上依次编号为 I ~ IV,各层之间上下表面紧密贴合,并将其与侧壁之间的空隙用木屑填实,容器内上下端均垫有木材。

除在密封容器底部中心布置一个热电偶外,在第 II 层木材圆盘上呈 90° 布置两组热电偶(图 1)。为防止木材热解产生的水蒸气对温度测量带来影响,将热电偶的正负极导线分别从测点两侧的预留孔引出,并用耐高温胶将测点与线槽等处密封。端盖上的预留孔亦可作为泄压孔,未进行特殊处理,仅在端盖与木材之间垫上两层耐火纤维毡,以减小外部火焰场通过预留孔对密封容器内部的影响。

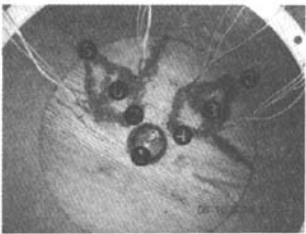


图 1 容器内圆盘试件的测点布置

Fig. 1 Position of thermocouple in a disc sample

1.2 试验方法

将密封容器置于燃烧室中心位置的支架上,测点⑤位于底部,测点②位于喷嘴的一侧,如图 2 所示。试验时通过喷嘴向燃烧室内喷射火焰,将温度升至 800 °C 左右,试验时间为 30 min。试验结束,待容器冷却到常温后,将容器拆解,观察测量木材的炭化程度、尺寸变化和质量损失。

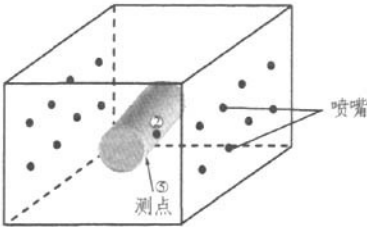


图 2 容器在燃烧室内的放置示意图

Fig. 2 Installation of vessel in combustion chamber

2 结果与分析

2.1 木材热解炭化

试验前后,密封容器内木材质量变化见表 1。

表 1 试验前后的木材质量

Tab. 1 Wood mass before and after pyrolysis

密封容器	初始质量/kg	试验后质量/kg	质量损失/kg	损失率/%
1#	18.5	12	6.5	35.1
2#	65.5	45	20.5	31.2

从表 1 可见,容器体积越小,质量损失越大,1# 和 2# 容器内木材的质量损失,占各自木材总量的 35.1% 和 31.2%。有研究表明^[6],木材的热解质量损失,按温度可分为:常温~180 °C、180~380 °C 和 380~500 °C 三个阶段。第一和第三阶段是由于木材内部自由水和结合水的逸出,以及热解后的固体残炭进一步燃烧导致的质量损失;木材热解主要发生在第二阶段,质量损失高达 70%。与文献相比,本试验木材试样的尺寸较大,在 30 min 的试验过程中木材并未完全炭化,因此质量损失相对较小。

拆解后的观察结果也表明,木材热解主要发生在木材与容器壁接触的表层向内一定厚度区域内,而中心大部分区域仍为原木。以第 II 层圆盘为例,正对喷嘴的一侧,由于温度相对较高,炭化层约 50 mm;而远离喷嘴的部位,炭化层仅约 25 mm,使未炭化部分呈不规则的凸轮状(图 3)。因受外部火焰场温度分

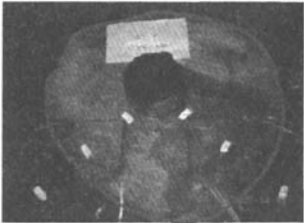


图 3 第 II 层木材圆盘炭化情况

Fig. 3 Second layer carbonization in wood

布不均、木材本身导热系数低以及各向异性等因素的影响,热解后生成的炭化层厚度分布亦不均匀。表明对于大尺寸木材试件,其炭化除自身因素外,还受到燃烧室内的具体位置、放置方式以及炉内温度分布等因素的综合影响。

2.2 木材收缩

从试验结果可以看出,木材炭化层的收缩是以每层木材圆盘为基础,沿径向和高度方向由外向内收缩,1# 和 2# 容器内各木材圆盘最终外径缩至 280 mm 和 446 mm。在此过程中,受炭化层各部分温度分布不均,以及木材纹理方向、表面缺陷等因素的影响,炭化表面产生龟裂,形成众多炭化小块,产生大量的缝隙(如图 4)。这些缝隙为容器内木材热解产生的高温高压气体向木材内部扩散创造了条件,加速了木材的热解,并使第Ⅱ、Ⅲ层木材圆盘的上下表面的热解程度和炭化程度大于侧面。



图 4 木材表面炭化结果

Fig. 4 Wood surface carbonization

2.3 木材各层温度分布

两容器内部的温度,随着时间的延续具有相同的变化规律,测点①、②和⑤位于容器内壁,从试验开始至木材发生第二阶段热解,其温度可视为木材表面温度,这三个测点的温度变化较快,在 10 min 内上升至 400 °C,而位于底部测点⑤的温度,明显低于侧面正对喷嘴的测点②。这表明在高温条件下,木材外表面迅速发生热解炭化,但各部位的温度分布不均造成热解炭化程度不同的主要原因。

相对于边部测点,中部测点的温度变化要缓慢得多,但其变化趋势也较复杂(如图 5 所示)。

图 5 中试件中部测点温度变化,与单纯导热时内部温度缓慢上升的变化规律存在着明显的差异。对试验现象和结果的综合分析认为,容器内木材热解产生大量水蒸气,在高温高压以及密封环境下,扩散到木材中部,并参与热量传递,成为除导热外的另一种重要传热方式,也是导致木材中部测点温度变化的主要原因。由于木材热解是一个动态的过程,在不同阶

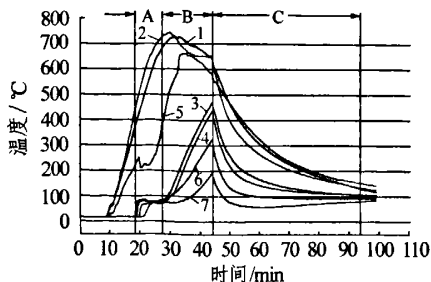


图 5 试件内部测点温度的变化曲线

Fig. 5 Temperature distribution in wood interior

段,热解气体量的不同,导致密封容器内温度、压力各不相同。试件内部 A、B、C 区域内的温度变化:

1) A 区域中,内部测点温度迅速上升时,边部测点的温度约为 400 °C,此时木材外层已经发生热解,所产生的热解气体充斥在容器内部。随着温度继续升高,气体压力增大,已炭化部分表面收缩产生缝隙的增加,使高温高压的气体向各层木材内部扩散,各层木材上下表面温度迅速增加。随着木材热解的加剧,产生的气体越多,压力亦越大,最终高压气体从预留孔向外喷射,产生瞬间的降压,故 A 区域后半段各测点的温度稍有下降。

2) B 区域中,虽然容器内部热解气体按一定速率经预留孔向外喷射,但产生的气体量大于外喷射的量,容器内压力仍在持续升高,导致了各测点温度再次快速上升。

3) C 区域中,由于停止了火焰喷射,外部温度突然下降,使容器内部木材热解速率放缓,甚至停止,产生气体的量减少,容器内外压力不平衡,导致木材内部测点温度迅速下降,直至容器内外压力重新达到平衡后,各测点温度趋于稳定,最后依靠导热使木材内部温度缓慢上升。

3 结论

1) 模拟火灾条件下,密封容器内木材的热解炭化,主要发生在其表层向内一定厚度的区域内,内部大部分区域仍为原木;容器的体积越小,热解炭化程度越大。受容器在火场内的具体位置影响,迎火面炭化层的厚度大于背火面;

2) 密封容器内木材热解炭化及收缩是以单块木材为基础,在收缩时易沿着木材纹理方向以及在表面缺陷处产生缝隙,最终对整个木材的热解炭化产生影响;

(下转 17 页)

表 4 国产齿板与进口齿板承载性能的对比

Tab. 4 Comparison of ultimate strengths between imported and domestic truss plates

板齿指标	节点类型	自制齿板	进口齿板
极限 承载力/ MPa	$\theta=0^\circ$	0.655	1.92
	$\alpha=0^\circ \quad \theta=90^\circ$	0.704	1.35
	$\alpha=90^\circ \quad \theta=0^\circ$	0.477	1.97
	$\theta=90^\circ$	0.438	1.35
抗剪极限承 载力设计值/ ($N \cdot mm^{-1}$)	$\theta=0^\circ$	92.586	85.39
	$\theta=90^\circ$	96.770	105.51
	$\theta=120^\circ$	84.208	89.78
	$\theta=30^\circ$	78.165	84.11

限承载力低于进口齿板,但抗剪极限承载力相近。在今后齿板设计和生产方面,要继续吸收国外的先进技术,改良齿板形状、钢板材料以及齿板模具制造工艺,从而提高齿板的刚度。

2) 木材材质对齿板连接节点的承载力影响极大。需要针对工程中常用树种的木材,分别研究其齿板连接性能。此外,规格材的阻燃、防腐处理和含水率等因素的影响也有待研究。

3) 国标中关于齿板连接承载力的计算方法等,均参考加拿大的设计方法,采用的是以概率理论为基础的极限状态分析方法。

在使用过程中,木结构因温度、湿度等因素的变化,对齿板承载力产生的影响有待进一步分析测定;在齿板连接承载力的设计计算时,应考虑我国的具体情况。

国标中齿板连接滑移承载力,是齿板和规格材之间产生 0.8 mm 的滑移量时的承载力,系直接引自加拿大的木结构设计规范,并未根据我国工程的情况进

行修正。今后还应考察分析滑移量与承载力的变化关系。

4) GB 50005-2003《木结构设计规范》中,首次引入了齿板连接的轻型木结构的概念、试验、承载力计算公式等,但仍缺乏关于齿板连接的实际工程经验与大量试验数据。对试验规范,仅提出了几种性能的测试手段,并未对测试试件进行规范,特别是对规格材的尺寸没有要求。

参考文献:

[1] 木结构设计手册编辑委员会. 木结构设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 96-97.

[2] TPIC-1996. Truss Design Procedures and Specifications for Light Metal Plate Connected Wood Trusses [J/OL]. <http://www.tpic.ca/tpic96/index.html>.

[3] 郭伟, 费本华, 赵荣军, 等. 木桁架齿板连接性能及影响因子研究现状[J]. 木材工业, 2008, 22(6): 24-27.

[4] 许晓梁. 轻型木桁架承载能力研究[D]. 上海: 同济大学, 2006: 13-14.

[5] Robert H White. Fire Endurance Model for Metal Plate Connected Wood Trusses [J/OL]. <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1992/white92b.pdf>.

[6] Triche M H, Suddarth S K. Advanced design of metal plate connector joints [J]. Forest Products Journal, 1988, 38(9): 7-12.

[7] Keenan F J, P Dubelsten, T Klajnerman, et al. Strength interactions of finger joints and truss plate joints in light wood trusses[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1983, 10(3): 466-480.

[8] 佟慧超. 简明木结构设计施工资料集成[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 93-94.

(责任编辑 姜 征、张一萍)

(上接第 13 页)

3) 在高温及密封条件下,木材热解过程中会产生极大的压力,增加了密封容器破坏的风险,对容器的安全性提出了较高的要求。同时,木材炭化表面产生的缝隙,对木材中部的热解过程以及木材层间的表面温度分布产生影响,致使容器中心位置的温度高于导热为主的传热方式时的温度。

参考文献:

[1] International Atomic Energy Agency. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material[S]. Safety Standards Series No. TS-R-1 (ST-1, Revised), 1996 Edition (Revised), IAEA,

Vienna (2000).

[2] Office of the Federal Register. Packaging and Transportation of Radioactive Material[M]. Code of Federal Regulations, Title 10, Part 71, Washington, DC, January 1994.

[3] 阎昊鹏, 陆熙炯, 秦特夫. 热重法研究木材热解反应动力学[J]. 木材工业, 1997, 11(2): 14-18.

[4] 宋长忠, 方梦祥, 余春江, 等. 杉木热解及燃烧特性热天平模拟实验研究[J]. 燃烧科学学报, 2005, 33(1): 68-72.

[5] 杨立中, 邓志华, 陈晓军. 可燃材料火灾性能参数的实验研究[J]. 火灾科学, 2000, 9(4): 32-37.

[6] 宋长忠. 火灾可燃物热解动力学及着火特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

(责任编辑 鲍加芬)