

国内外木结构建筑耐火性能的研究进展

蒋 瞻¹, 付海燕¹, 王 正¹, 李敏敏¹, 丁叶蔚¹, 刘中洋¹, 赵天长²

(1. 南京林业大学, 江苏 南京 210037; 2. 江苏森之虎建筑工程有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 为推动现代木结构建筑在国内的发展, 分析了木结构建筑耐火的关键性, 重点介绍了近二十年来国内外在木结构建筑耐火模拟测试、建筑及其结构耐火极限试验、防火材料应用和软木制品的保温隔热检测与耐火应用等方面的研究进展及成果。在学习和借鉴的基础上, 通过总结国外研究成果和经验, 提出目前国内在木结构建筑耐火研究方面尚存在的一些问题, 与国外相比研究工作的薄弱环节。建议在国内外已有的木结构建筑相关标准规范基础上, 加强国内在木结构建筑防火研究的理论基础工作, 尤其是模拟试验研究, 为木结构建筑的耐火性能评估奠定基础。同时, 强调软木材料自身特性, 提出在木结构建筑构件及其连接节点处使用软木材料覆面, 在保证实用性的基础上, 还起到绝缘、隔热、装饰的作用, 进一步提高木构件的防火性能, 从而提高建筑整体的耐火性。通过上述分析, 以期为我国现代木结构建筑防火优化设计提供有益参考。

关键词: 木结构建筑; 耐火模拟; 耐火性能试验; 软木耐火试验; 存在问题; 主要措施; 研究进展

中图分类号: S771.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3776 (2019) 02-0110-05

Research Progress on Fire Resistance of Domestic and Overseas Wood Structure Buildings

JIANG Zhan¹, Fu Hai-yan¹, WANG Zheng¹, LI Min-min¹, DING Yi-wei¹, LIU Zhong-yang¹, ZHANG Tian-chang²

(1. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Jiangsu Tiger Woods Construction Engineering Company Ltd, Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to promote the development of modern wood structure buildings in China, this paper analyzed the key of wooden structure fire resistance and mainly introduced fire simulation test, building and structure fire resistance test, fire prevention materials application and insulation detection of cork product and the research progress of refractory application and achievements in the field of domestic and overseas refractory research of wood construction in the recent 20 years. On the basis of study and reference, the author put forward some existing problems and weak links in domestic research on wood structure buildings fire resistance compared with foreign research by summarizing foreign research results and experience. It is suggested to strengthen the theoretical foundation of domestic fire prevention research on wood structure buildings, especially the simulation test research, on the basis of the existing domestic and foreign standards and regulations on wood structure buildings to lay a foundation for the fire resistance evaluation of wood structure buildings. At the same time, it emphasized characteristic of cork material and put forward to use cork material cladding in place of components of wooden structure and its joining node. On the basis of ensuring practicability, it also played a role of insulation, heat insulation and decoration to further improve the refractory performance of wood components to improve the fire resistance of the building as a whole. Through the above analysis, to provide useful reference for the fire prevention optimization design and process testing of wood structure buildings in China.

Key words: Wood structure buildings; Fire resistance simulation; Refractory performance test; Cork fireresistance test; Existing-problem; Main measures; Research progress

收稿日期: 2018-10-08; 修回日期: 2019-01-16

基金项目: 2017 年江苏省科技厅政策引导类 (苏北科技专项) 项目 (SZ-SQ2017016)

作者简介: 蒋瞻, 高级工程师, 从事土木工程施工; E-mail: jiangzhan@njfu.edu.cn。通信作者: 王正, 博士, 高工, 从事木结构建筑工程与无损检测; E-mail: wangzheng63258@163.com。

火是可燃物与助燃物发生氧化反应时释放光和热的现象,是一种猛烈的能量释放的方式,当其失去控制时,就会成为一种破坏力极大的灾难,给人类的生活、生产甚至生命构成威胁^[1]。据央视网 2019 年 1 月 21 日报道的应急管理部消防救援局统计资料表明:2018 年全国共接报火灾 23.7 万起,死亡 1 407 人,受伤 798 人,直接财产损失 36.75 亿元。其中,近八成死亡人数集中于住宅。2013 年 3 月 27 日,在马来西亚沙巴州首府哥打基纳巴鲁约 40 km 的一处水上木屋区遭大火吞噬。大火烧毁了 400 多间木屋,造成 1 人因吸入过多浓烟死亡,数十名村民受伤,3 000 余人失去家园^[2]。2014 年 3 月 31 日 5:00,美国德克萨斯州休斯敦市西部加斯纳地区一座木结构公寓楼发生着火。由于火势凶猛,这座公寓楼的顶部在 1h 内塌落,随后不久整座公寓楼被大火烧塌。100 多名居民纷纷逃离,造成了巨大的财产损失^[3]。

我国传统的住宅建筑多为木结构建筑,随着工业化的发展,木结构建筑逐渐被砖混建筑、钢筋混凝土建筑、钢结构等现代建筑取代。20 世纪 80 年代初,为缓解我国森林资源匮乏的矛盾,政府曾限制木质产品的发展,鼓励采用铝、钢、塑料等代替木质材料^[4]。我国加入 WTO 后,国内的木结构建筑行业得到了明显的发展。且近年来因环保问题备受重视,有关部门已对住宅建设的节能、节材和环保工作等提出了新要求。现代木结构建筑因其具有的节能、环保、耐用等诸多优点而成为整个国家一种典型的节能环保型建筑。木结构建筑在居住的舒适度方面与传统的钢筋混凝土结构建筑和钢结构建筑相比优势明显,并在我国具有非常广阔的市场前景^[5-6]。然而,目前木结构建筑在我国的推广工作还面临诸多困难,其中主要阻碍之一则是木结构建筑的耐火性能问题^[7]。

木材具有质量较轻、强度高、易加工和环保可再生等优点,是现代木结构建筑最主要的建筑材料。但木材为可燃性材料,其用作结构时通常暴露在大气之中,使得木结构建筑的耐火等级较低,易燃烧^[8-10]。若木结构建筑通风效果好,出现明火后,火势易迅速蔓延,形成立体燃烧,导致严重的后果。为减少木结构建筑因发生火灾带来不必要的损失,进行木结构防火研究必要而现实^[11]。

众所周知,木材为可燃性材料,亦是木结构建筑的主要建筑材料。木结构建筑的防火工作尤为重要,其耐火性能是衡量木结构建筑设计水平的关键指标之一。为了促进我国木结构建筑耐火性能技术的发展,本文从木结构建筑防火工作的现实性和迫切性出发,重点介绍了近二十年来国内外在木结构建筑耐火模拟及其测试、建筑及其结构耐火性能测试、防火材料应用和软木制品的保温隔热检测与耐火应用等方面的最新研究进展及成果,并分析了目前国内在木结构建筑耐火研究领域存在的问题。针对进一步做好我国木结构建筑防火工作,文中还提出了在国内外木结构建筑相关标准规范的基础上,掌握国外最新科研动态及学术成果;重视对木建筑整体及其构件耐火性的基础理论工作;优化木建筑整体及其构件耐火性能设计,并满足结构防火的环保安全要求等主要措施。上述以期为人们创造更安全的居住环境,对促进我国在木结构建筑的耐火结构设计优化与工艺、检测创新等方面工作具有借鉴价值。

1 国内外木结构耐火性能的研究

从 20 世纪 80 年代英国出台第一部建筑防火规范开始,国外相关研究学者在建筑结构防火方面进行了大量研究工作^[12-14]。我国从 20 世纪 90 年代才开始系统地进行建筑结构的防火研究,尤其是钢结构的防火研究^[15-17]。因木结构建筑发展受到局限,在木结构建筑防火研究方面发展较为缓慢。现有木结构建筑的防火措施仍局限于在建筑表面涂刷防火材料,通过隔火焰、防热辐射、隔氧等防火,对建筑构件的防火保护作用是有限的^[18-20]。

1.1 木结构耐火模拟及其试验研究进展

在国内木建筑耐火模拟及其试验研究方面,目前研究学者仍沿用传统的耐火极限试验法测试建筑及其构件的耐火性能,较少研究采用模拟试验评估建筑耐火性。在 2014 年,陈建峰对木柱火灾后的耐火极限做进行了研究。他运用有限元软件(ANSYS),采用热-结构间接耦合法对木柱进行温度场和耐火极限分析,并将分析结果与试验值比较,进而对木柱的耐火极限进行参数分析。研究结果表明:随着温度的升高,木柱表层和里层温度都有不同程度的上升,离木柱表面越近的点升温速度越快,最终温度越高。木柱随着木材密度的增加,耐火极限上升,但上升的幅度越来越小;随着加持荷载水平的增加,耐火极限不断下降,而且下降的越来越快^[21]。

国外研究人员在木结构建筑的耐火模拟方法上开展了多元化研究,取得较好的成果。2004 年, Nouredine

Benichou 等人为检测轻型木结构框架的耐火性能,设计了一种新型耐火试验模型,测试出了该模型在高温下形成的碳化木的力学性能,并绘制出材料耐火曲线,进一步完善了模拟火灾的试验方法^[22]。2007 年, Jukka Hietaniemi 提出了一种概率模拟的方法来评估木制承重梁在火灾中的耐火性能。该方法引入了几种新型的建模技术,可模拟火灾下木梁的多项力学性能。运用火灾概率模拟器模拟了火灾中的一些不确定因素,系统全面地检测了木制承重梁在火灾中的各项力学性能^[23]。2011 年, Schnabl 提出了受火木柱屈曲性能的半解析数学模型。该数学模型可用来考虑不同材料参数、几何参数和含水率对木柱临界屈曲荷载的影响。结果表明:木柱的极限承载力随着受火时间的增长而减小。木柱剩余截面大小随着受火试件的增大而非线性减小,且含水率对剩余截面减小的速度有重要影响,含水率越大,截面减小的速度越小^[24]。

上述引入的多种建模技术,创建数学模型、概率模拟等评估木结构建筑及其构件耐火性能研究成果,对我国在耐火结构设计优化与创新等方面的工作具有借鉴价值。

1.2 木结构耐火性能测试研究进展

近年来,国内外相关研究学者对木结构建筑及其构件的耐火性能进行了一系列探索研究。2015 年,王茂靛指出,在木结构建筑的耐火研究方面,国内外主要在对木构件建筑的整体火灾特性进行研究,考虑不同处理方法对其防火性能的影响^[25]。2010 年,范新海等详细地介绍了火灾下木材温度,以及力学性能和炭化特性。根据炭化率计算公式及其火灾下木材力学性能计算在火灾下木构件由于炭化造成有效截面减少,但木材的炭化率一般在 6% ~ 7%,由于重型木结构构件截面尺寸较大,同时炭化层又对其内部木材具有隔热作用,因此重型木结构本身具有较好的抗火性能^[26]。木结构建筑构件的耐火试验对象涉及到诸如建筑墙体、楼板、墙体用石膏板、梁、柱和连接节点等。2012 年,李丹力等分别实测 7 种轻质木结构墙体的耐火极限,其结果均达到设计值要求。结论表明,墙体结构中的墙骨柱在火灾情况下具有很高的承载力,且石膏板的厚度越大、层数越多,墙体耐火时间就越长^[27]。同年,倪照鹏等人对木结构墙体、楼板与天花板、胶合木梁和木柱进行一系列标准耐火试验,对其耐火性能、破坏模式进行试验研究。研究结果表明:木结构墙体和楼板的耐火极限与防火石膏板厚度及层数有关,耐火极限要求为 1.0 h 的承重墙需要 15 mm 厚的防火石膏板保护;而耐火极限要求为 0.5 h 的非承重墙需要 12 mm 厚的防火石膏板保护;要满足楼板 1.0 h 的耐火极限要求,则需要双层 12 mm 厚的防火石膏板保护^[28]。对于石膏板和承重木梁、木柱结构,主要研究其在受火后的炭化过程和力学性能变化情况。该研究通过对用防火剂涂刷的木塑复合材料、石灰膏抹面木梁、炭化木梁、无防火措施木梁和木柱进行耐火极限试验,为结构的安全设计提供参考依据^[29-32]。2013 年,张晋等人采用水平燃烧炉,并依据 IS0834 标准火灾温度曲线进行了 5 组共 32 根木柱单面或相邻两面受火的耐火试验,并测试其试件受火后的剩余受压承载力。试验结果表明:木柱有效面积因受火炭化而减小,靠近炭化层的高温分解层木材强度明显劣化,无防火措施、防火涂料和石灰膏抹面木柱的炭化速度均值分别为 1.1, 0.39 和 0.7 mm·min⁻¹;石膏抹面和防火涂料能有效延缓木构件开始炭化的时间,且防火涂料防火效果更为显著,极限承载力、极限位移和刚度随着受火时间增加而减小,截面积较大的木柱剩余承载力下降程度明显小于截面积较小的木柱^[33]。

国外在木结构建筑方面理论基础研究较为完善,已有系统的防火措施及规范。2001 年, Leslie R 对内墙石膏板和吊顶石膏板做了全面、大量的耐火试验,检测了石膏板与木框架组合模型在不同等级火灾情形下的耐火性和消防耐久性,并建立了一个 CFRP 强化钢筋混凝土 T 型梁的有限元模型,模拟实际火灾测试。提出的耐火性能测试方法,对轻型木结构耐火试验和防火性能检测具有非常重要的意义^[34]。2004 年, Firmanti 等对受火木梁在不同荷载水平下的受力性能进行相关试验研究。结果表明:持荷比与炭化深度及质量损失成正比,与木梁的耐火极限成反比,并建立了耐火时间与持荷水平的关系曲线^[35]。2006 年, Anita Firmanti 等指出,在木结构建筑防火方面的研究主要是针对木材、结构石膏板、木梁、木柱等进行耐火极限试验研究,评价不同材料或构件的火灾特性,检测其耐火时间与持荷水平等^[36]。

目前,国内木结构建筑尚处于发展阶段,其完善的配套规范尚不完善,尤其是在木结构建筑的防火性能研究上仍处于探索期中。其研究局限于采用增加构件厚度和密度、防火涂料涂刷、石灰膏抹面,以及通过隔火焰、防热辐射和隔氧等防火等手段来提高木结构整体和构件的耐火性能工作。显而易见,使用这些方法对木结构建

筑的耐火效果和燃烧中的高温滴落物的危害性等研究方面尚存在不足。

1.3 软木耐火试验研究进展

近年来,国内外学者研究发现,软木具有质轻、绝缘、隔热、防潮、难燃等优点,常应用于室内装饰,在实用的基础上还能提高舒适度和美感^[37]。通过对不同软木材料的内部结构、传热机理、热学特性及相关力学性能试验研究,发现其在建筑结构防火应用方面有很好的发展前景^[38-40]。2010年,魏新莉采用热重分析仪研究不同软木的热学性能,总结其热解过程分为4个阶段,且513~693 K是软木热解的主要阶段,根据热分解速率方程,得到软木的热解动力学方程^[41]。2013年,魏新莉以国产栓皮栎 *Quercus variabilis* 软木为对象,对比葡萄牙栓皮栎软木,研究了软木细胞的固相骨架的传热机理和热学特性,以及软木热处理后软木细胞固相骨架传热特征变化,并对软木制品的保温隔热性能进行了优化研究^[42]。同年,S. P. Silva等人用微观和宏观相结合的研究方法详细地分析了软木及其产品的化学成分、物理性能和机械性能。通过相关试验与分析,证明了软木是一种导热率极低的高适应性天然材料,具有很好的保温效果及阻燃作用,是理想的防火、保温材料^[43]。2015年,Luís Gil对新型软木材料发展形势及未来发展方向作了总结,分析软木材料的机械性能和其他物理性能,重点强调了软木材料优异的防火性能,并提出软木材料及其衍生产品在防火应用工程方面具有很大的发展空间,并呼吁工程师、建筑师和设计师在相关领域考虑优先应用软木材料^[44]。2018年,蒋瞻等人为了提升现代木结构建筑的柱体耐火性能,采用密度为118 kg·m⁻³的葡萄牙软木板,分别对工程中常用的6种不同木柱和钢柱结构件进行复合设计、制造和耐火性能测试。其结果表明:葡萄牙软木板越厚,其与木柱的复合结构件的耐火极限时间则越长;在同厚度的葡萄牙软木板保护下,软木板与钢柱结合的复合结构件的防火作用优于与木柱结合的复合结构件;有葡萄牙软木板保护的防火复合结构柱件在火灾中不会产生高温滴落物,可防止其对人身财产造成危害^[45]。

目前,国内研究学者在外包软木材料的建筑构件的耐火性能方面的试验研究工作较少。在实际应用中,为了实现木结构建筑的防火及室内环保、舒适性要求,可将软木板固定在标准的木结构部件表层上,主要起阻燃作用,提高建筑整体的耐火性,同时软木可作为建筑局部装修材料,可达到装饰美观的效果。

2 展望

为了进一步提高我国现代木结构建筑的防火性能,为木结构建筑的防火设计提供技术支撑,笔者在已有建筑及其构件防火性能研究的基础上,提出了掌握国外最新科研动态及学术成果,完善木结构建筑相关标准规范的制订与实施工作;深化对木结构建筑的整体及其构件耐火性能的基础理论研究,以及优化结构耐火结构设计与耐火性能检测等主要工作措施。

(1) 在国内外木结构建筑相关标准规范的基础上,掌握国外最新科研动态及学术成果。

(2) 重视对木建筑整体及其构件耐火性的基础理论工作。如,加强国内木结构建筑耐火模拟试验研究,将传统的耐火极限试验法和数值模拟法相结合,通过试验来验证模拟方法的准确性,为木结构建筑的耐火性能评估奠定基础。

(3) 优化木建筑整体及其构件耐火性能设计,并满足结构防火的环保安全要求。针对木结构住宅建筑自身的特点,可在耐火结构设计和工艺检测方面开展一系列的优化与创新等工作。如,在建筑防火结构设计中,不应局限于涂刷防火材料的处理设计等技术。可根据功能要求,可将天然的软木板引入到木结构建筑的防火技术体系中,利用其独特的传热机理和宏观上所表现出的优异耐火性能,采用将其与现代木结构建筑屋盖、楼盖、墙体、地面等部件及其连接节点部位外包软木板材料方式,以提高现代木结构整体防火性能。在工艺检测中,对软木板与木结构部件组合形成的防火复合结构进行胶合强度、耐火极限、高温滴落物等性能检测。以此可增强木结构建筑的隔热效果,提高木构件的防火性能,从而提高建筑整体的耐火性。同时,火灾后不会产生高温且有危害的滴落物,可防止其对人身财产造成的不利后果。

总之,通过发展具有中国特色的木结构建筑的防火技术,有利于我国现代木结构建筑的设计研究和工程应用工作,引导和促进我国木结构建筑行业持续、健康地向前发展。

参考文献:

- [1] 田玉敏. 建筑火灾风险评价体系的建立与应用探讨[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(8): 74-79.
- [2] 高菲. 马来西亚巴沙州水上木屋发生火灾[N]. 新华网, 2014-7-30.
- [3] 刘晓朋. 美国休斯敦一寓楼发生大火[N]. 新华网, 2014-04-01.
- [4] 郭伟, 费本华, 陈恩灵, 等. 我国木结构建筑行业发展现状分析[J]. 木材工业, 2009, 23(2): 19-22.
- [5] 丁玫, 李鹏. 木结构建筑的优势及发展[J]. 林产工业, 2014(4): 41-43.
- [6] 王智恒, 杨小军. 我国现代木结构建筑的现状与发展综述[J]. 木工机床, 2011(2): 5-8.
- [7] 张晋, 李成, 张悦洋, 等. 木结构抗火性能及防火设计研究现状[J]. 工业建筑, 2016, 46(2): 113-119.
- [8] 温留来, 韩刘杨, 周海滨. 木材燃烧炭化行为研究与建议[J]. 林产工业, 2015(8): 18-21.
- [9] 陈咏军, 祁忆青. 木结构建筑用多种木材燃烧性能研究[J]. 林业工程学报, 2016, 1(4): 51-57.
- [10] 黄晓东. 竹胶合板阻燃性能研究[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(2): 146-149.
- [11] 于晓龙, 宋杰红. 轻型木结构建筑防火、防风、防震及防护设计研究[J]. 建筑结构, 2010, 40: 89-91.
- [12] R H Fakury, E B Las Casas, F Pacifico F Jr, et al. Design of semi-continuous composite steel-concrete beams at the fire limit state[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005(61): 1094-1107.
- [13] Erich Hugl, Regina Weber. Fire behaviour of tropical and European wood and fire resistance of fire doors made of this wood[J]. Fire Technology, 2012(48): 679-698.
- [14] R A Hawileh, M Naseri, W Zaidan, et al. Modeling of insulated CFRP-strengthened reinforced concrete T-beam exposed to fire[J]. Engineering Structures, 2009(31): 3072-3079.
- [15] 孙玉兴, 董亮, 赵春华. 防腐蚀及防火涂料在钢结构中的应用[J]. 空间结构, 2002, 8(4): 61-63.
- [16] 邓小波, 杨森, 高萍, 等. 钢结构防火涂料的研究现状、应用、发展方向及防火性能检测方法的研究[J]. 化工新型材料, 2010, 38(9): 57-60.
- [17] 常力, 何欣, 宋文华, 等. 基于FDS和经验公式法的综合性钢结构建筑防火研究[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2017, 50(3): 84-90.
- [18] 邵二国. 我国防火材料的应用和发展[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2012, 43(4): 633-634.
- [19] 黄晓东, 林巧佳. 聚氨酯防火涂料阻燃性能的研究[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(2): 179-182.
- [20] 叶雁冰. 桂西北传统吊脚楼防火改造[J]. 工业建筑, 2012, 42(10): 170-174.
- [21] 陈建峰. 木柱火灾后耐火极限研究[J]. 消防技术与产品信息, 2014, 36(8): 38-41.
- [22] Noureddine, Benichou, M.A.Sultan. Fire resistance behaviour of lightweight framed construction [J], Structures in Fire, 2004, 2(3): 119-136.
- [23] Jukka Hietaniemi. Probabilistic simulation of fire endurance of a wooden beam[J]. Structural Safety, 2007, 29(4): 322-336.
- [24] Schnabl S, Turk G, Planinc I. Buckling of Timber Columns Exposed to Fire[J]. Fire Safety Journal, 2011, 46(7): 431-439.
- [25] 王茂靛. 木结构建筑防火技术研究[J]. 建筑科学, 2015(25): 266.
- [26] 范新海, 张盛东, 屈文俊. 重型木结构抗火设计方法介绍[J]. 结构工程师, 2010, 26(6): 16-20.
- [27] 李丹力, 邱培芳, 倪照鹏. 轻型木结构墙体耐火试验研究[J]. 消防科学与技术, 2012, 31(10): 1029-1032.
- [28] 倪照鹏, 彭磊, 邱培芳, 等. 木结构建筑构件耐火性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(12): 108-114.
- [29] 许清风, 李向民, 穆保岗, 等. 石灰膏抹面木梁受火后受力性能静力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(7): 73-79.
- [30] 方露, 李大纲, 施迎春, 等. 木塑复合材料表面防火涂层制备及其耐久性能[J]. 塑料工业, 2011, 39(9): 112-115.
- [31] 许清风, 李向民, 张晋, 等. 木梁三面受火后力学性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(7): 64-70.
- [32] 张晋, 许清风, 李维滨, 等. 木梁四面受火炭化速度及剩余受弯承载力试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(2): 24-33.
- [33] 张晋, 许清风, 商景祥. 木柱单面及相邻两面受火后的剩余承载力试验[J]. 沈阳工业大学学报, 2013, 35(4): 461-468.
- [34] Leslie R Richardson. Thoughts and observations on fire-endurance tests of wood-frame assemblies protected by gypsum board[J]. Fire and Materials, 2001, 25(6): 223-239.
- [35] Firmanti A, Subiyanto B, Takino S, et al. The Critical Stress in Various Stress Levels of Bending Member on Fire Exposure for Mechanical Graded Lumber[J]. Journal of Wood Science, 2004, 50(5): 385-390.
- [36] Anita Firmanti, Bambang Subiyanto, Shuichi Kawai. Evaluation of the fire endurance of mechanically graded timber in bending[J]. The Japan Wood Research Society, 2006(52): 25-32.
- [37] 杨蕾. 浅析软木墙板在室内装饰中的应用及发展[J]. 门窗, 2013(12): 52-53.
- [38] 虞红. 软木作为运载火箭隔热材料的研究[J]. 上海航天, 1995(5): 54-56.
- [39] 陆全济, 雷亚芳, 赵浸峰, 等. 软木及软木橡胶复合板导热性能研究[J]. 林产工业, 2015(12): 27-31.
- [40] 徐之江, 朱维薇. 保温软木的隔振[J]. 噪声与振动控制, 1984(6): 39-45.
- [41] 魏新莉, 向仕龙. 中南林业科技大学学报[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(3): 114-117.
- [42] 魏新莉. 软木传热机理与保温性能优化研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013.
- [43] S P Silva, M A Sabino, et al. Cork: properties, capabilities and applications[J]. International Materials Reviews, 2013, 50(6): 345-365.
- [44] Lu í Gil. New Cork-Based Materials and Applications[J]. Materials, 2015, 8(2): 625-637.
- [45] 蒋瞻, 谢文博, 王正, 等. 软木复合结构建筑柱体耐火性能研究[J]. 西南林业大学学报, 2018, 38(4): 161-166.