

土木工程民居抗震性能 及加固设计方法

潘文 薛建阳 白羽 陶忠 著



科学出版社

土木工程民居抗震性能 及加固设计方法

潘文 薛建阳 白羽 陶忠 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

中国传统民居是中国传统文化的重要组成部分，具有很高的文化和历史价值，其产生和发展是自然、社会、经济、文化等因素影响的综合反映，具有浓厚的中国传统文化特色，是中国传统建筑中的佼佼者。本书全面、系统地对中国传统民居中的木结构及土木结构的发展历程、力学性能及加固措施进行了研究和介绍。

本书主要内容包括：传统木结构民居破坏形式的调研；对存在一定松动程度的榫卯节点的试验研究；传统木构架民居加固改造技术措施的试验研究；土木结构中土坯墙和土筑墙基本力学性能的试验研究；改性土坯墙基本力学性能的试验研究；土坯砌体等效体积单元和土坯墙片的数值模拟分析。同时，书中根据现代建筑理论，对传统木结构民居抗震技术及安全性提升措施进行了介绍。

本书内容丰富、资料翔实，可供从事中国传统民居建筑研究的科研人员及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

土木结构民居抗震性能及加固设计方法/潘文等著. —北京：科学出版社，2017.9

ISBN 978-7-03-054360-8

I. ①土… II. ①潘… III. ①土木结构-民居-抗震性能②土木结构-民居-加固 IV. ①TU241.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 216465 号

责任编辑：童安齐 / 责任校对：王万红
责任印制：吕春珉 / 封面设计：东方人华

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年9月第一版 开本：B5 (720×1000)

2017年9月第一次印刷 印张：20 1/2

字数：400 000

定价：95.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换〈骏杰〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62137026 (BA08)

版权所有，侵权必究

举报电话：010-64030229；010-64034315；13501151303

前 言

中国传统民居是先民们经过不断的实践和经验积累而创造出来的居住建筑，它集中体现了中华民族的生存智慧、建造技艺、社会伦理及审美观念，是传承中国传统文化的重要载体，也是我国宝贵的文化遗产资源。在漫长的发展历程中，中国传统民居受各地气候、环境、文化及建筑材料等方面的影响，形成了不同类型、不同风格的建筑形态，具有鲜明的地域特色和民族特征。其中不仅蕴含着古人营造活动所积累的丰富经验，还包含了民居建筑与自然环境相适宜的营造观念及多种文化交融所形成的人文特征，承载和记录了最为真实、丰富的历史信息。

近代以来，众多学者对官式建筑进行了调研、测绘、发掘及研究分析，相当多的宫殿、寺、塔等古代官式建筑作为文物将被永久保存，但对传统民居这种数量最多、分布区域最广的传统建筑形态，却极少涉猎。早期的中国传统民居研究，多是单纯地对现存民居建筑进行测绘调查，从技术、手法上加以归纳分析，对其所产生的历史背景、文化因素、气候地理等自然条件以及使用人的生活、习俗、信仰等对建筑的影响进行分析，而极少涉及中国传统民居整体结构和构件力学性能以及建筑材料力学特性等方面的研究。

传统木结构民居和传统生土结构民居是中国传统民居中最为常见的两种形式。传统木结构民居具有良好的承载力、变形能力，且耗能少，它的许多特殊构造，如柱础浮搁、榫卯连接等，不仅展示了其独特的艺术风格，而且也决定了其传力机理、抗震性能的优越性，构成了合理、科学的结构体系。历次地震中，与其他结构形式的民居相比，木结构民居震害相对较轻，就充分说明了这一点。传统生土结构民居由于取材方便、造价低廉，在很多经济发展滞后、交通不便的地区仍在大量采用。

现存的传统土木结构民居也存在诸多问题，如围护墙体与木结构缺乏可靠连接，自身稳定性较差，地震时相互之间不能协同工作，大震时容易倒塌。随着建造技艺的逐步失传、建造质量的逐步下降以及年久失修等诸多原因，地震中很多木结构民居在 8 度及以上烈度区产生严重破

坏,出现节点脱榫、滑落、杆件断裂甚至整体散架现象,生土结构的承重墙大量倒塌;有相当一部分未受保护的传统民居分布在经济发展相对滞后的地区,对其进行研究和安全性能提升是一种抢救性的工作。

要使这些珍贵的中国传统民居尽可能长久地传承下去,针对木结构和生土结构传统民居的抗震性能及加固技术研究迫在眉睫,特别是要从其根本的结构特性方面进行研究,包括它们当前的状态、安全状况及相应的加固措施,进而提出合理的保护方法,并正确把握技术应用的层级、难易,真正做到技术成果具有可操作性、适用性与经济性,最终能“为民所用”。为此,课题组先后进行了传统木结构、生土结构民居破坏形式的调研、传统木构架民居加固改造技术措施的试验研究,包括榫卯节点、土木结构中土坯墙和土筑墙、改性土坯墙等基本力学性能试验等。

本书由潘文、薛建阳、白羽和陶忠撰写。在本书的研究过程中,杨晓东、赵立玖、李义柱、付高攀、兰香、况浩伟、周强、董金爽、代武强等都付出了大量心血和精力。此外,本书的研究内容得到国家“十二五”科技支撑计划课题“传统村落结构安全性能提升关键技术与示范”(编号:2014BAL06B03)、国家自然科学基金“古建筑木结构残损性能评估与地震破坏机制的研究”(编号:51678478)、陕西省“乡土建筑营造技术研究与应用”重点科技创新团队计划(编号:2014KCT-31)、中建股份科技研发课题(编号:CSCEC-2012-Z-16)等的支持。本书能得以顺利完成,还要感谢关心中国传统民居研究的诸多学者,他们对书中的内容提出了很多宝贵的意见。

限于作者水平,书中不足之处在所难免,恳请广大读者不吝赐正,不胜感激。

目 录

第一篇 传统木结构民居抗震性能及加固研究

第 1 章 中国传统木结构民居概述	3
1.1 传统木结构民居研究背景及意义	3
1.2 木结构的发展历程	3
1.2.1 国内木结构发展历程	4
1.2.2 国外木结构发展历程	6
1.3 中国传统木结构民居分类	8
1.3.1 穿斗式木结构	8
1.3.2 抬梁式木结构	9
1.3.3 干栏式木结构	10
1.3.4 井干式木结构	11
1.4 中国传统木结构民居现状及存在问题	12
1.4.1 中国传统木结构民居现状	12
1.4.2 功能性不足	12
1.4.3 安全性不足	13
第 2 章 民居木构架破坏形式分析	15
2.1 柱脚	15
2.1.1 柱脚形式及性能	15
2.1.2 破坏形式及原因	16
2.2 节点	18
2.2.1 节点连接形式	18
2.2.2 节点破坏形式及原因分析	20
2.3 材料强度不足	21
2.3.1 木柱木梁	21
2.3.2 墙体	21
2.4 墙体破坏	22
2.4.1 墙体形式	22
2.4.2 震害类型	23

2.4.3	破坏原因分析	23
2.5	整体性缺陷	24
2.5.1	构造缺陷形式	24
2.5.2	破坏形式	25
2.6	屋架破坏形式及原因分析	26
2.7	场地及地基缺陷	27
2.8	本章小结	29
第3章	不同松动程度下木结构燕尾榫节点抗震性能试验研究	30
3.1	概述	30
3.2	试验内容及目的	30
3.3	试验概况	31
3.3.1	模型设计与制作	31
3.3.2	试件材性试验	32
3.3.3	人工模拟松动方法	37
3.3.4	加载方案	39
3.3.5	量测方案	40
3.4	节点抗震性能分析	40
3.4.1	试验过程及破坏形态	40
3.4.2	节点模型弯矩-转角 ($M-\theta$) 滞回曲线	41
3.4.3	节点模型弯矩-转角 ($M-\theta$) 骨架曲线	43
3.4.4	节点模型承载力分析	44
3.4.5	节点模型刚度退化	45
3.4.6	节点模型强度退化	46
3.4.7	节点模型耗能分析	47
3.4.8	节点模型变形能力分析	48
3.4.9	榫头拔榫量分析	49
3.4.10	节点模型应变分析	50
3.5	基于 ABAQUS 的燕尾榫节点有限元建模及参数分析	52
3.5.1	简述	52
3.5.2	有限元计算模型	52
3.5.3	有限元计算结果与试验结果对比	53
3.5.4	应力分析	57
3.5.5	参数分析	65
3.6	试验及有限元分析结论	73
3.6.1	不同松动程度下燕尾榫节点拟静力试验	73
3.6.2	不同松动程度下燕尾榫节点有限元建模及参数分析	74

第 4 章 传统木构架民居加固改造技术措施	75
4.1 柱脚加固及其实际中的应用	76
4.1.1 构造形式改造	76
4.1.2 钢筋加固改造	77
4.1.3 铁件加固	78
4.2 节点加固措施及其实际应用	80
4.2.1 铁件加固	81
4.2.2 木斜撑加固	85
4.2.3 替木加固	86
4.3 纵向连接	87
4.4 楼面、屋面支撑	88
4.5 木构架与墙体连接	88
4.5.1 砖墙与木柱连接	88
4.5.2 土墙与木柱连接	90
4.6 本章小结	93
第 5 章 民居木构架节点加固试验及结果分析	94
5.1 概述	94
5.2 试验内容及目的	94
5.3 设计试件与分组	94
5.3.1 试件参数及分组	94
5.3.2 试件制作	96
5.4 加载方案及测点布置	97
5.4.1 试验加载装置与措施	97
5.4.2 加载方案	98
5.4.3 测量内容及测点布置	98
5.5 试验结果分析	99
5.5.1 试验过程及破坏形态	99
5.5.2 滞回曲线	109
5.5.3 骨架曲线	114
5.5.4 节点拔榫量	116
5.5.5 延性	117
5.5.6 试验结论及加固建议	118

第 6 章	木构架村镇民居的抗震性能分析	121
6.1	木构架村镇民居的构造特点及抗震机理	121
6.1.1	木构架的构造特点	121
6.1.2	木结构农村民居的震害特点	123
6.1.3	木结构半刚性节点的计算方法	123
6.2	木结构农村民居的抗震计算实例	124
6.2.1	计算模型	124
6.2.2	计算简图	125
6.2.3	计算结果及分析	128
6.3	本章小结	130
第 7 章	木结构民居抗震技术及安全性提升措施	132
7.1	木结构农村民居的抗震技术措施	132
7.1.1	抗震设防的一般规定	132
7.1.2	木结构房屋的抗震构造措施	133
7.1.3	围护结构的抗震措施	144
7.1.4	木结构房屋施工、检查与维修	149
7.2	木电分离	151
7.2.1	木结构的火灾特点	151
7.2.2	木结构建筑起火条件分析	152
7.2.3	木电分离方法	152
7.3	围护墙改造	154
7.3.1	房屋的震害情况	154
7.3.2	生土围护墙的特点	154
7.3.3	围护墙加强措施	156

第二篇 传统土结构民居抗震性能试验研究

第 8 章	村镇地区土-木结构民居的震害	159
8.1	木结构-土围护墙房屋的基本形式	159
8.1.1	我国木结构房屋的发展简况	159
8.1.2	木结构民居房屋结构类型	160
8.1.3	农村民居木结构墙体种类	164
8.2	农村民居木结构房屋的震害特征	165
8.2.1	木结构房屋的震害等级与震害指数	165

8.2.2	木构架承重房屋的抗震性能简述	167
第 9 章	农村民居土坯墙和土筑墙基本力学性能的试验研究	174
9.1	单块土坯及泥浆强度试验研究	174
9.1.1	试件的制作及数量	174
9.1.2	试验加载方案及试验步骤	175
9.1.3	试验结果	178
9.1.4	单块土坯力学性能分析	184
9.2	土坯砌体基本力学性能试验研究	185
9.2.1	土坯砌体抗压强度试验研究	186
9.2.2	土坯砌体抗剪强度试验研究	203
9.2.3	土坯砌体抗弯强度试验研究	207
9.3	土坯砌体摩阻系数测定	210
9.4	土坯墙片单向水平加载试验研究	212
9.4.1	无筋墙体的破坏形态	212
9.4.2	无筋墙体抗剪强度计算理论	214
9.4.3	土坯墙片单向水平加载试验	215
9.5	土筑墙片单向水平荷载试验研究	219
9.5.1	土筑墙片的制作和养护	220
9.5.2	嵩明土土筑墙片单向水平加载试验——顶部加载	222
9.5.3	嵩明土土筑墙片单向水平加载试验——中部加载	225
9.5.4	禄劝土土筑墙片单向水平加载试验	230
9.5.5	土筑墙试验结果讨论	236
9.6	本章小结	246
第 10 章	改性土坯、墙片基本力学性能试验研究	249
10.1	单块改性土坯试验	249
10.1.1	试件的制作及数量	249
10.1.2	试验过程与结果	250
10.1.3	试验结果分析	276
10.2	改性泥浆试验	280
10.2.1	试验方案	281
10.2.2	泥浆材料的物理力学性能试验	282
10.2.3	砌筑泥浆改性试验	284
10.2.4	土坯砌体抗剪强度的理论分析	286
10.3	改性土坯墙体单向水平加载试验	288
10.3.1	试件制作	288

10.3.2	试验过程及结果	290
10.3.3	试验结果分析	293
10.4	竹筋土筑墙的单向水平加载试验	294
10.4.1	试件制作	294
10.4.2	试验过程及结果	295
10.4.3	试验结果分析	298
10.5	本章小结	298
第 11 章	土坯砌体等效体积单元和土坯墙片的分析	300
11.1	土坯砌体 RVE 的参数计算	300
11.1.1	土坯砌体的 RVE 模型	300
11.1.2	RVE 的受力全过程模拟	302
11.1.3	RVE 等效弹性常数	307
11.1.4	试验墙片的有限元模拟	309
11.2	土坯墙片的 RVE 分析	310
11.2.1	土坯墙有限元模型	310
11.2.2	数值计算结果及分析	311
11.3	本章小结	314
	主要参考文献	315

第一篇 传统木结构民居
抗震性能及加固研究

第 1 章 中国传统木结构民居概述

1.1 传统木结构民居研究背景及意义

中国传统民居是集中体现民族生存智慧、建造技艺、社会伦理和审美意识等最丰富、最集中的载体，也是我国宝贵的物质文化与非物质文化遗产资源。我国传统民居因各地气候、环境、文化等方面的差异，在自然演化过程中形成了丰富多样的建筑形态，构成了绚丽多彩的乡村风貌，体现了强烈的地域特征的和民间智慧，承载了最为真实、丰富的历史信息。由于保护体系不完善，同时随着工业化、城镇化和农业现代化的快速发展，大量传统民居正在遭受人为的和自然的破坏，并且在以惊人的速度消亡，成百上千年积淀下来的地域传统文化面临湮灭的威胁。

总体上，传统木结构民居具有良好的承载力、变形能力，且耗能少，其安全性较其他民居相对优良，但从历次震害调研资料看，有相当部分木结构民居在 8 度以上烈度区产生严重破坏，出现节点脱榫、滑落，杆件断裂，甚至整体散架现象。另外，国内传统木结构民居的围护墙体一般为生土墙体或砖砌墙体，这些围护墙与木结构主体之间缺乏可靠连接，地震时相互之间不能协同工作，且自身稳定性较差，大震时非常容易倒塌。同时，有相当部分未受保护的的传统民居分布在经济发展相对滞后的地区，对这部分民居安全性能提升的关键是技术的可操作性、适用性与经济性。

因此，传统民居要得以长久保留，必须对其展开必要的研究，提出合理的保护和修缮方法，并正确的把握技术应用的层级、难易，真正做到技术成果最终能“为民所用”。针对木结构传统民居的抗震性能及加固技术研究迫在眉睫。

朱良文先生曾用“适应、合理、变通、兼容”八个字对“传统民居”核心价值进行概括，也表达了民居保护是为了利用，在利用中才能体现保护的价值。按照《民用建筑设计通则》（GB 50352—2005）中指出的适用、经济、安全、卫生和环保等基本要求，传统民居结构安全性能提升的同时，应尽可能保持原有的建筑风格、风貌，对有些规格较高的古民居应尽可能保存现状或恢复原状，保存原本的建筑形制，保存原来的建筑结构。对于木结构民居改造，始终本着经济、适用、安全等原则进行，让居住者有更好的居住体验，更为适应现代化的生活环境。

1.2 木结构的发展历程

人类历史发展的早期是没有房屋的，人们为了生存不断寻找食物，四处奔波。

后来，原始人类依靠自身智慧不再为食物奔波，但每天都生活在固定地点又会成为食肉动物的目标，于是，可抵御攻击的房屋就出现了。慢慢地，人口扩张，原有的环境不能满足生活所需，人们不断改造生存环境，相应的房屋形式也越发复杂。随着时间的推移、技术的进步，房屋给了人们安全感，人们对居住环境不断提出新的要求，房屋也在不断改善。而木材是人类最早用其进行房屋建筑所使用的材料之一，也是直到现代还一直被广泛使用的建筑材料，与水泥、钢材并称为建筑三大材料。

1.2.1 国内木结构发展历程

中国最早的木结构建筑可以追溯到七千多年前的石器时代。《孟子·滕文公》记载“下者为巢，上者为营窟”，即地势低洼潮湿的地段作巢居，地势高亢燥爽的地段作穴居。这是合乎实际的，而且已为考古发掘所证实。地势高亢的黄土地带，营造穴居很方便，又由于地下水位较低，防潮比较容易处理，因此穴居成为黄土地带原始居住建筑的主要形式。凡是地势较高、有条件挖筑穴居的地方，不仅在黄河流域，即使在长江流域、珠江流域以及西南、东北地区，凡具备黄土地带条件，总是采取穴居的方式（图 1.1）。然而对于地势低洼的沼泽地带来说，巢居以其特有的优越性，成为这类地区原始建筑的主流（图 1.2）。

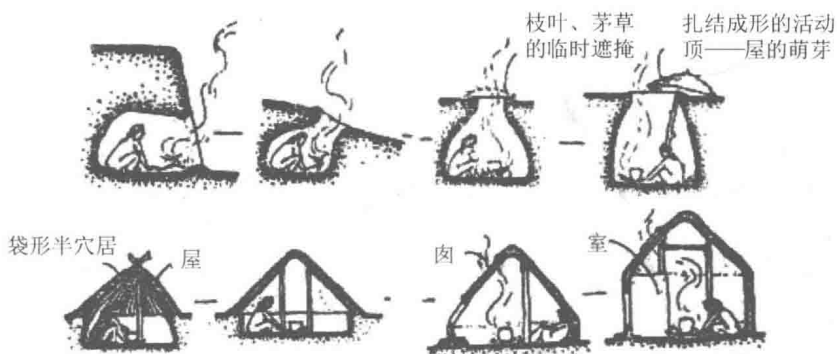


图 1.1 穴居到地面的演变

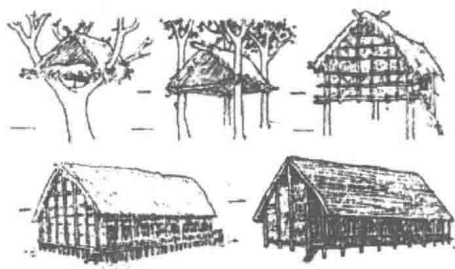


图 1.2 巢居到地面的演变

在浙江余姚出土的河姆渡时代的遗址中就发现某些干栏式建筑的残骸，如图 1.3 和图 1.4 所示，这是我国已发现的第一个采用榫卯技术的木结构房屋建筑遗址。



图 1.3 河姆渡遗址出土木构件

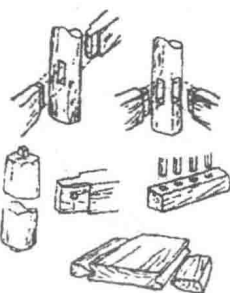


图 1.4 河姆渡遗址构件示意图

夏、商、周时期，黄河中下游地区已经出现夯土技术，并且已出土的陕西省岐山周原建筑遗址则表明民居院落雏形也在这一时期出现。春秋战国时期，二至三层的多层木结构已经出现，采用夯土台为中心，周围用空间较小的木架建筑环抱。

木结构在唐宋时期已经发展得趋近于完善，其中以榫卯连接的木框架结构已经相当成熟。木结构建筑解决了大面积、大体量的技术问题，并已定型化。大明宫麟德殿面积 5000m^2 ，采用了面阔 11 间、进深 17 间的柱网布置，如图 1.5 所示。

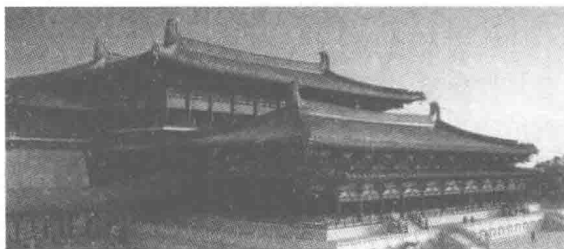


图 1.5 麟德殿复原图

到了北宋时期，我国拥有了第一部完整的介绍了建筑设计和经验总结的书籍——《营造法式》。该书记录了官家大式、大木等的做法，规定了建筑形式、结构做法和构件尺寸。清朝的官式建筑在明代定型化的基础上，用官方规范的形式固定下来。雍正十二年（1735 年）颁布的《清工部工程做法》一书，列举了 27 种单体建筑的大木做法，并对斗拱、装修、石作、瓦作、铜作、铁作、画作等做法和用工、用料都作了规定。《清工部工程做法》和宋代李诫《营造法式》是中国古代由官方颁布的关于建筑标准的仅有的两部古籍，梁思成先生将此两部建筑典籍称为“中国建筑的两部文法课本”。

19 世纪中期以后，砖木结构逐渐在国内有了一席之地。相比于传统木结构具有较大优越性，因砖石外墙与内部木柱共同承重，具有结构合理、取材方便、技术简单等特点，因而得到了广泛流传。这其中较为典型的的就是上海汇中饭店（现为和平饭店南楼），整栋楼是 6 层砖木混合结构，总高 30m。

新中国成立后头两个“五年计划”期间，由于建设速度较快，木结构能就地取材又易于加工，砖木结构占相当比例，特别是“大跃进”时期竟达到46%。随着砖石、钢筋混凝土混合结构、钢和钢筋混凝土框架结构的引入和发展，砖木结构逐渐被二者依次替代，形成了现代城市建筑从传统的木结构建筑转换到钢筋混凝土建筑为主的格局。20世纪80年代时，结构用木材已经在我国采伐殆尽，再加上国家外汇储备不充足，不能从国外进口木材，为了缓解我国森林资源贫乏的矛盾，政府曾一度下令限制木制建筑产品的发展，鼓励采用铝、钢、塑料等木制构件的代用品。在政府限制下大专院校停开木结构课程，并停止培养研究生，原来从事木结构的教学和科技人员不得不改弦易辙，木结构学科无形中在中国消亡长达20多年。

近年来在政府不断努力下，我国森林覆盖率已经从最低时的6.0%提升到21.6%。随着我国经济的发展，近几年，在北美国家十分流行的轻型木结构住宅进入了中国市场。其倡导人文关怀的基本理念，推广回归自然的健康住宅，为用户提供了房屋建筑的更多选择，引起了人们的广泛关注。

1.2.2 国外木结构发展历程

在提及西方木结构建筑时，首先浮现在脑海的是神庙、教堂、宫廷及皇家的公共性建筑，而这些建筑又是以砖石结构为主。再加上西方建筑史的主线是以砖石结构为主的宗教建筑，给人留下一个西方木结构发展历程较短的印象。但西方民居却从来没有停止过木结构使用和发展的脚步，成为西方建筑和结构发展的另一条主线。

对于西方木结构建筑并没有系统地按照时间顺序记录，只是在以砖石结构为主体的建筑史中提到一些比较零散的木结构建筑。Rowland J. Mainstone 所著书中对于木拱、木桁架的发展有所论述。国外有文献对于地区性的木结构建筑进行了介绍，如 Sobon Jack 的著作中对美国早期的木结构建筑所进行的介绍。而对于目前北美流行的木结构建筑，一方面有专门建筑书籍进行介绍，如 Burchell Jim 著的 *Timber Frame Housing*，Stungo Naomi 著的 *The New Wood Architecture* 等；另一方面由加拿大和美国的木材推广部门编辑的相关刊物、手册等也都比较全面地介绍了当代木结构建筑的发展状况。

希腊早期的建筑就主要是木结构，包括庙宇和一般的民居。由于木材自身易燃、易腐朽的特性，古希腊人便使用陶片来保护木结构。公元前7世纪时，陶片贴面技术已经成熟的应用在木结构建筑上。以至于在后期的石质建筑上仍然能够看到之前木结构上的陶片贴面，并且建筑风格也有木结构的影子（图1.6）。奥古斯都的军事工程师维特鲁威描述了最早的木屋架形式：由两根相对的木料构成人字形，中间用水平的联系杆件连接。这个时期已经具有很高的木桁架技术，当时的古希腊人已经可以辨别受压杆件和受拉杆件，而且在节点上也使用了相应的构