

# 轻钢模块化建筑技术在美国 ADU 项目中的应用

宋麾君 黄靓文

浙江南方建筑设计有限公司

DOI:10.12238/btr.v7i5.4540

**[摘要]** 以美国附属居住单元(ADU)项目为机会,探索冷弯薄壁轻钢结构体系,在模块化住宅设计和建造中的技术应用。从设计角度,通过对ADU功能的分解,将厨房、卫生间的多样化3D模块,结合墙体、屋面的2D模块,拼接出多种的户型,满足不同客户个性化的需求。从技术角度,探索如何充分发挥冷弯薄壁轻钢结构的强度高、耐久好、易施工等优势,并在构造上弥补该结构的防火性、隔热性和隔音性的不足,从而总结出合理的构造做法。

**[关键词]** 美国附属居住单元ADU; 冷弯薄壁轻钢结构; 模块化建筑技术; 装配式建筑

中图分类号: TU-098.6 文献标识码: A

## Application of Light Steel Modular Building Technology in ADU Projects in the United States

Huijun Song Liangwen Huang

Zhejiang Southern Architectural Design Co., Ltd

**[Abstract]** Taking the Affiliated Residential Unit (ADU) project in the United States as an opportunity, this paper explores the technical application of cold-formed thin-walled light steel structure system in modular residential design and construction. From a design perspective, by decomposing the functions of the ADU, diverse 3D modules of the kitchen and bathroom are combined with 2D modules of the walls and roofs to create a variety of layouts that meet the personalized needs of different customers. From a technical perspective, explore how to fully utilize the advantages of high strength, good durability, and easy construction of cold-formed thin-walled light steel structures, and make up for the shortcomings of fire resistance, thermal insulation, and sound insulation in the structure, in order to summarize reasonable construction methods.

**[Key words]** American Residential Unit (ADU); Cold formed thin-walled light steel structure; Modular building technology; Prefabricated building

### 引言

美国多年来建房速度跟不上人口增长带来的需求,房屋短缺问题严重。住宅供不应求,造成房价和房租的快速上涨。常规建造房屋的方式,耗时耗力,品质良莠不齐。而模块化建造住宅的技术能有效增加住房供应,缓解住房紧张的状况。同时随着各州推出附属住宅单元(Accessory dwell Unit,简称ADU)的政策,小型化、模块化、快速建造的住宅单元应运而生,并且很快受到市场的青睐。

### 1 ADU与模块化装配式建筑技术的概述

#### 1.1 ADU的概述

附属住宅单元(ADU),在美国也被称作附属住宅单元或加建屋,是一种在单户住宅用地上额外建造的小型住宅单元。ADU通常比主住宅单元小,面积从500到1200平方英尺(约46.5到112平方米)不等,但具备完整的居住功能,包括厨房、浴室、起居/睡

眠空间以及独立的入口,以确保居住者的私密性和舒适性。

ADU的主要功能是提供额外的居住空间,可以是为家庭成员、老年人、或租户设计的独立生活空间。它们可以独立于主住宅单元存在,如后院小屋、车库改造的住宅,或者与主住宅单元共享墙壁的附属结构。ADU的灵活性使其成为解决住房紧张、提供可负担住房以及适应人口老龄化趋势的有效途径。

#### 1.2 模块化装配式建筑技术的概述

模块化装配式建筑技术是一种新型的建筑方式。它是将建筑分解成若干个模块,这些模块在工厂中预先制作完成,包括墙体、楼板、楼梯、卫生间等单元。然后将这些预制好的模块运输到施工现场,通过可靠的连接方式进行组装,就像搭积木一样快速地建造房屋。

模块化装配建筑技术包括三个步骤:

##### 1.2.1 模块设计

要考虑模块的尺寸和形状,使其便于运输和安装。一般模块的尺寸会受到运输车辆和道路条件的限制。例如,公路运输的模块宽度通常不超过3-3.5米,高度不超过4.5米左右。从中国生产运输到美国组装,还需要考虑海运集装箱的尺寸要求。一般集装箱尺寸有20尺、40尺和40尺高柜。

同时要注重模块的结构设计,确保其在运输、吊装和使用过程中的安全性。要合理设计其梁柱结构,使其能够承受自身重量以及使用过程中的活荷载。

### 1.2.2 预制生产

冷弯薄壁轻钢结构采用先进的数控化机床技术可以提高生产效率和质量。建筑主体、墙体、屋面、地面、内装饰、卫生间、厨房等模块在工厂全部预制完成。可以保证产品较高的质量。

(1)现场组装。模块的连接技术是关键。冷弯薄壁轻钢结构模块常见的连接方式有螺栓连接、焊接等(为便于施工并保证质量,尽量不在现场焊接)。现场的施工组织和精度控制也很重要。施工人员需要严格按照安装顺序和技术要求进行操作,并且要利用测量仪器确保模块安装的位置精度,如水平度和垂直度等指标符合设计要求。

## 2 冷弯薄壁轻钢结构在模块化住宅建筑中的技术优势

### 2.1 冷弯薄壁轻钢结构与木结构对比

目前在美国的住宅建设中,绝大多数采用木材作为主体结构,钢结构占比不足5%。为何模块化住宅建筑更适合选用冷弯薄壁轻钢结构体系,以下从成本、建造时间、结构强度、耐久性、防火性、保温隔热性能、施工工艺……等方面做出对比:

#### 2.1.1 成本对比

(1)木结构的成本优势:①取材便利。在美国,木材从HOME DEPOT等各类建材超市都可以轻松购买到。完成施工后,还可以把剩下的木材还给建筑公司获得退款,或者搬运到另一个建筑工地。②组装工艺成熟。可以轻松找到组装木框架的专业团队,甚至不需要制作详细的图纸,因为许多经验丰富的专业人员熟练掌握木框架结构的规范知识和施工技术。

(2)木结构的成本劣势:不断增长的价格是木结构面临的最大问题。例如,奥斯汀两年前建造房屋OSB板材价格是50美元,今天达到150美元,价格增长了三倍。

(3)轻钢结构的成本优势:①钢材的价格已基本接近木材,成为木结构最好的替代方式。②工厂复合预制、现场快速组装的钢结构住宅,人工成本显著降低。美国住宅建造成本中,50-55%为人工成本,40-45%为建材和设备,5%为设计/审批费用。轻钢复合快装建造房屋,人工成本可以缩减50%左右。

(4)轻钢结构的成本劣势:①产业链还不成熟。虽然目前材料价格与木材接近,但还需要找专业公司设计图纸、制作框架、专业组装。目前这样的专业团队相对较少,因此整体成本略高。但随着轻钢结构房屋的推广,成本能够进一步降低。②设备维修成本较高。若出现维修或后期增加设备,电工、管道工、空调维修工的工作会变得更复杂,因此维修价格更高。

#### 2.1.2 建造时间对比

(1)传统木结构房屋建造时间(从基础到装修)平均为12个月。

(2)轻钢结构房屋建造时间可缩短至6个月(包含2个月的工厂制造订货时间)。

(3)轻钢结构2D复合墙板拼装模式的建造时间可缩短至3个月(包含2个月订货时间,现场完成仅需1个月)。

#### 2.1.3 结构强度对比

轻钢结构整体的强度比传统木结构更强,因此具有更好的抗震性、抗风性、抗压性。

在飓风高频发地区,传统木屋难以抵挡150英里/时的风速。三级飓风(111-129英里/时)就能对其造成毁灭性打击。而轻钢结构住宅能够抵御四级甚至五级飓风(风速130英里/时以上),具有超强的抗风和抗压性能。

#### 2.1.4 耐久性对比

木结构易受潮、易腐烂、易受白蚁的侵害。前期做好防潮、防腐、防白蚁处理,但过后期,需经常维护,且成本较高。

轻钢结构表面被保护涂层覆盖,既不受湿气影响,也不会生锈。轻钢镀锌构件锈蚀率为三年平均不到0.1微米,也就是说,8微米厚镀锌冷弯薄壁型钢构件,正常使用条件下,使用寿命可达240年。并且经过使用的轻钢龙骨70年后仍可回收利用。

#### 2.1.5 防火性对比

木材和钢材本身都不是防火材料。但经过涂层覆盖的轻钢结构比木结构的防火性能更好。结构体本身为阻燃材料,墙体外再装配防火隔热的新型外墙板。内墙板采用B1级以上的耐火材料。使得整个房屋可以与火灾说再见。

#### 2.1.6 保温隔热性能

木材天然的绝缘性,保证了其良好的保温、隔热、隔音性能。钢材本身的绝缘性弱,但经过填充保温材料、内外保护层、防潮防水层等复合加工的墙板,其各项性能均表现优异。

#### 2.1.7 施工工艺

木结构框架许多弯曲,需要用板材覆盖调平。而轻钢结构配件在工厂由高精度数控加工设备完成,平整度高。组装后的框架更加横平竖直,平整精致。

木结构房屋的管线开孔,多为现场施工,费时费力。轻钢结构框架的给排水管道、线路穿孔等,在工厂预制完成。因此施工更便捷、速度更快。

### 2.2 冷弯薄壁轻钢模块住宅的各项性能

#### 2.2.1 物理性能指标

①耐久性能:70年以上的使用年限;②耐雪性能:1.55kN/m<sup>2</sup>的基本雪压;抗震性能:9度设防(基本地震加速度0.4g);③抗风性能:0.85kN/m<sup>2</sup>的基本风压,209km/hr的风速;④隔音性能:外墙隔音(200mm厚墙体)的隔声量为65dB,内墙(双面双层9.5mm石膏板,181mm墙体)隔声量为44dB;⑤通风性能:自然通风和送风相结合,保证室内空气清新洁净,新风量大于15%;⑥外墙抗冲击性能:250kg的集中冲击荷载;⑦保温隔热性能:200mm厚墙体的热阻值为4.24K·m<sup>2</sup>/W,其保温隔热性能是490mm厚多孔砌块砖的2倍。

2.2.2节能性能

冷弯轻钢结构住宅体系外墙采用双层保温结构,由内向外分别为:石膏板、轻钢龙骨、R19离心玻璃纤维棉、OSB(欧松板)、呼吸纸、挤塑板和外墙饰面层。由于墙体采用R19离心玻璃纤维棉和25mm厚挤塑板双层保温材料,墙体系统的热阻值可达到 $4.24K \cdot m^2/W$ ,其保温隔热性能是490mm厚多孔砌块砖墙体的2倍。

建筑屋盖由内向外分别为:石膏板、R30离心玻璃纤维棉、轻钢龙骨、OSB(欧松板)、防水卷材和屋面装饰层。封檐板为多孔构造,使整个屋架通风透气,流通的空气既可防霉也可起到保温隔热的作用,整个屋盖系统热阻值为 $5.284K \cdot m^2/W$ ,是普通120mm厚混凝土屋顶(热阻值为 $0.07K \cdot m^2/W$ )的75倍。

2.2.3环保性能

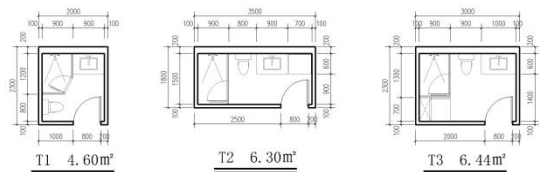
轻钢住宅体系产品所采用的建筑材料均为符合国家标准的绿色环保材料,所用轻钢龙骨70年后仍可回收利用,现场建造过程中大量使用成品构件安装,建造用水需求量小,整个建造过程比砖混结构大大减少废水、废尘和固体废弃物的排放,有利于当地环境的保护。轻钢住宅体系建造过程中材料损耗减少60%,现场垃圾减少80%,可回收材料占80%,建筑节能提高50%。

3 冷弯薄壁轻钢结构住宅建筑的模块化做法

3.1美国附属居住单元ADU项目工程实践

该项目位于美国加州洛杉矶市。近年来洛杉矶市政府通过多项法案大力推动附属居住单元ADU的建设,以缓解紧张的住房需求。我们在设计中采用多模块化的方式,将卫生间、厨房单独作为3D模块,其他空间的墙体、地面、屋面设计为2D模块。这样可以实现户型的不同拼接方式,满足不同客户的定制化需求。

卫生间模块



厨房模块

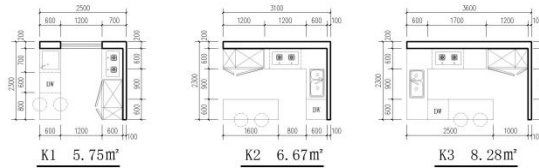


图1 多样化的卫生间和厨房模块

组合平面图

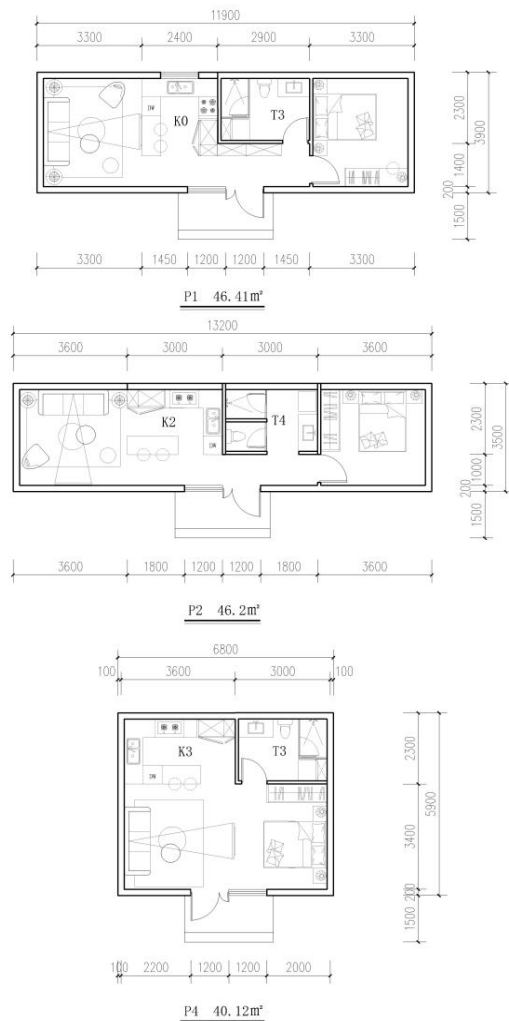
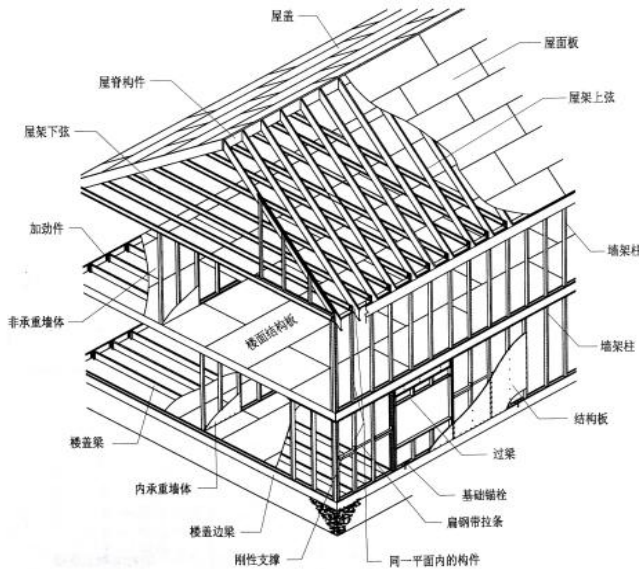


图2 多模块拼装成不同的组合平面

3.2构造做法

3.2.1全屋结构体系和房屋做法示意图



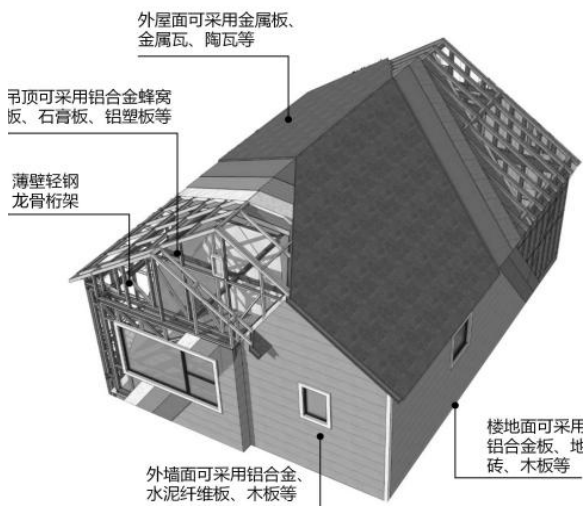


图3 全屋结构体系和房屋做法示意图

3.2.2墙体结构系统和复合墙体构造做法示意图

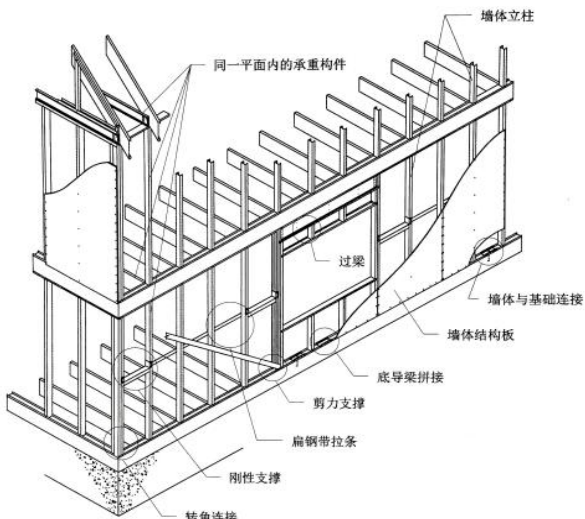


图4 墙体结构系统和复合墙体构造做法示意图

3.2.3屋面结构系统和复合屋面构造做法示意图

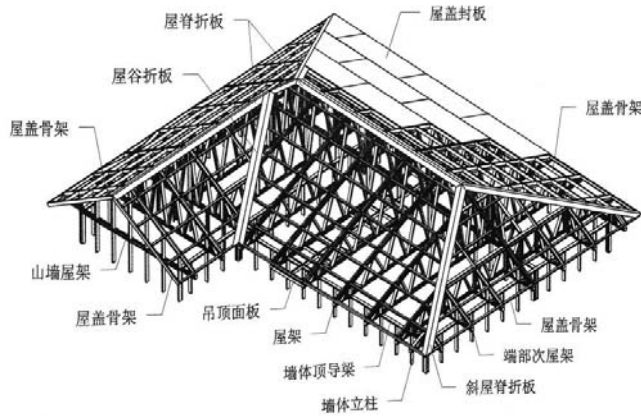


图5 墙体结构系统和复合墙体构造做法示意图

4 结语

随着冷弯轻钢结构建筑的技术越来越成熟,特别是模块化工程做法的大量实践,采用这样一种既轻便、又耐久、强度好、施工快的建造方式,一定会快速替代传统的建造方式,成为时代进步不可逆的趋势。本文从美国ADU项目这类体量相对较小的建筑作为探索的起点,相信今后会扩展到更多类型的住宅建筑中,形成一套完整成熟的新工艺、新做法。

[参考文献]

[1]住建部科技与产业化发展中心.2019装配式建筑发展概况[J].中国建筑金属结构,2020,(6):32-35.

[2]陈俊颖.低层冷弯薄壁型钢房屋装配式基础的应用研究[J].黑龙江科技信息,2016,(35):262.

[3]刁建新,孙周寅,姚胜,等.轻钢装配式建筑性能优化设计综述[J].科学技术与工程,2024,24(19):7956-7975.

[4]林正豪.近零能耗导向的轻质装配式建筑之围护系统设计研究[D].北京:清华大学,2018.

[5]张爱林,胡婷婷,刘学春.装配式钢结构住宅配套外墙分类及对比分析[J].工业建筑,2014,4(8):7-9,34.

[6]刘敬疆.多层轻钢住宅课题研究分报告——薄壁轻钢住宅建筑体系在我国住宅建设中的应用[J].住宅产业,2007,(8):34-38.

[7]潘志峰.轻钢结构装配式建筑材料构造技术研究[D].广州:华南理工大学,2012.

[8]戴俭,刘思远.新型“板拼式”轻钢装配式住宅体系初探[J].新建筑,2017,(2):24-27.

作者简介:

宋麾君(1982--),男,汉族,山西太原人,硕士,从事工作: 建筑和规划设计总监,国家一级注册建筑师,高级工程师,专家评委。

黄靓文(1989--),女,汉族,泉州人,本科,从事工作: 主创建筑师,建筑专业负责人。