



李麟学

同济大学建筑与城市规划学院教授，博士生导师，哈佛大学高级访问学者，麟和建筑工作室主持建筑师。

王瑾瑾

同济大学建筑与城市规划学院博士研究生。

MATERIAL TECTONICS OF ENERGY FLOW: RAMMED-EARTH WALL EXPERIMENT IN TOURIST CENTER OF YELLOW RIVER ESTUARY ECOLOGICAL TOURISM ZONE

作为能量媒介的材料建构 ——黄河口游客服务中心夯土实验

摘要 夯土作为传统的建造技艺，在当代的建造方式与体系下被赋予了新的意义。本次夯土实验基于“热力学”概念展开了一系列关于夯土墙的材料建构与空间设计，探讨如何利用“能量”媒介对地域气候做出有效回应，并最大程度减少能耗及对湿地环境的破坏。

关键词 夯土墙 材料建构 热力学 能量媒介

黄河口生态旅游区位于黄河入海口处的黄河三角洲国家级自然保护区内，拥有世界上最年轻、最完整、最壮美的湿地生态系统，而游客服务中心就位于该保护区的入口区域，在体量、景观、公共空间与流线等多方面与周边地貌、景观和谐共存。基地占地面积4.9万m²，总建筑面积9 900m²，建成后将成为集接待、展览、候车、餐饮、办公、会议于一体的综合性服务设施。三个体型平展的建筑错落展开，融入广袤的黄河湿地，六个院落嵌入其中，并通过巨大的开口与地景尺度相呼应（图1~3）。在热力学（thermodynamics¹）的理论基础之上，如何回应地域气候，并最大程度减少能耗，成为了该项目设计的初衷。建筑师选择夯土墙作为建筑主要的围护结构，其优良的保温隔热性能形成了对北方冬冷夏热地区气候的有力回应。此外，东西方向舒展平缓的建筑形体以及嵌入其中的院落为建筑内部的气流组织与阳光引入提供了载体，最大程度降低了建筑对环境的破坏，减少了能耗（图4~8）。

1 夯土实验——传统建造方式的当代表达

夯土技艺的产生可追溯到远古时代，不论在宫室还是乡间，夯土技艺因其可就地取材及建造技艺简单等得以广泛应用，成为中国古代最为重要的建筑技艺之一。然而进入现代，因为种种原因这一建造传统在中国并未得到良好的传承与发展。在黄河口游客服务中心项目中，建筑师尝试以突破性的夯土实验在借鉴传统建造方式的同时，回应当代建造方式与体系，为夯土建造技艺在当代的发展提供了又一范式。

1.1 传统建造技艺的“考古”

本夯土实验中，墙体的主要配料为水泥、砂、石子以及颜料，与中国传统的夯土墙（如客家土楼）相比，在原料上少去了重要的生土。但以砂石为主料的夯土墙体并非此次实验首创，早在中国古代潮汕地区就已出现以青砂和贝灰（主要成分为氧化钙，遇水后变成熟石灰，与水泥性质类似）为主料混合夯



图1 远观建造中的黄河口游客中心

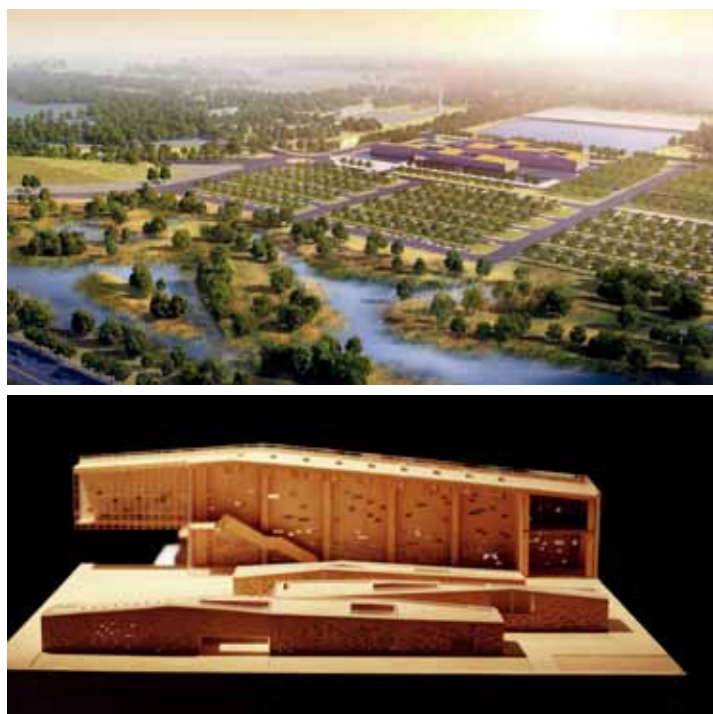


图2 黄河口湿地游客中心效果图与模型

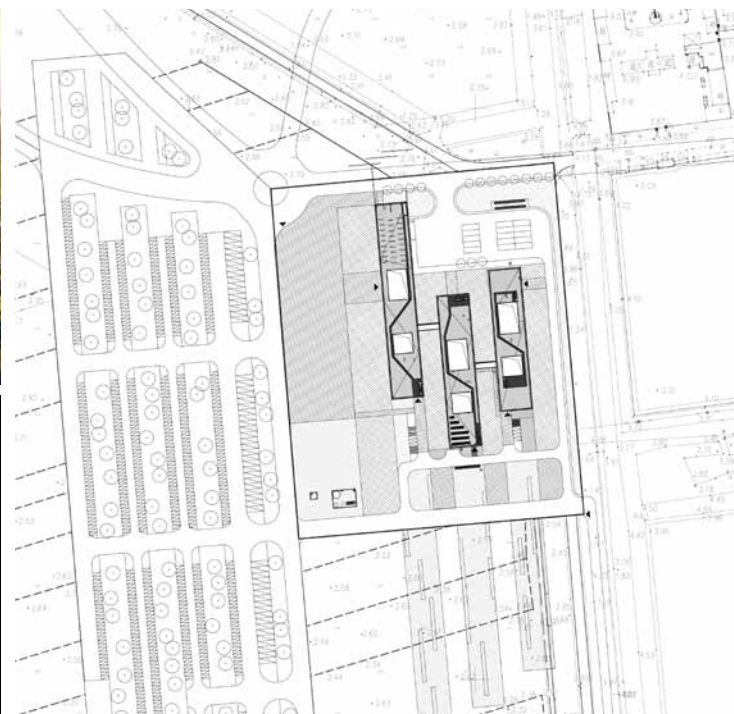


图3 总平面图

实而成的“贝灰版筑墙”，其材料成墙后硬度非常高，墙体坚固，不易风化，历经几百年虽批荡（即抹灰）无存，依然屹立不倒，甚至连一般的铁钉都无法钉入。^[1]此与本项目中的夯土墙体在成分配比及建造技艺上均非常类似，因而大可将本次夯土实验视作对传统建造技艺的一次创新性“考古”。

与传统夯土墙相比，本次夯土实验中的墙体材料在耐久性、耐候性、抗压强度等方面进行了很大改进——普通夯土墙的抗压强度约为4.3MPa，²而该墙体的抗压强度为25.4MPa，³远大于以生土为主料的传统夯土墙。其力学性能的大幅度提升，也使夯土墙体在高度与长度上不再受到太多限制，可更加灵活地与各种开窗方式结合，创造更为丰富的立面肌理（福建永定县客家土楼的一些五凤楼主楼可做到墙体厚度50~60cm，高度10~13m，夯土技艺已非常高超，但其无法在外立面上大面积灵活开窗）。

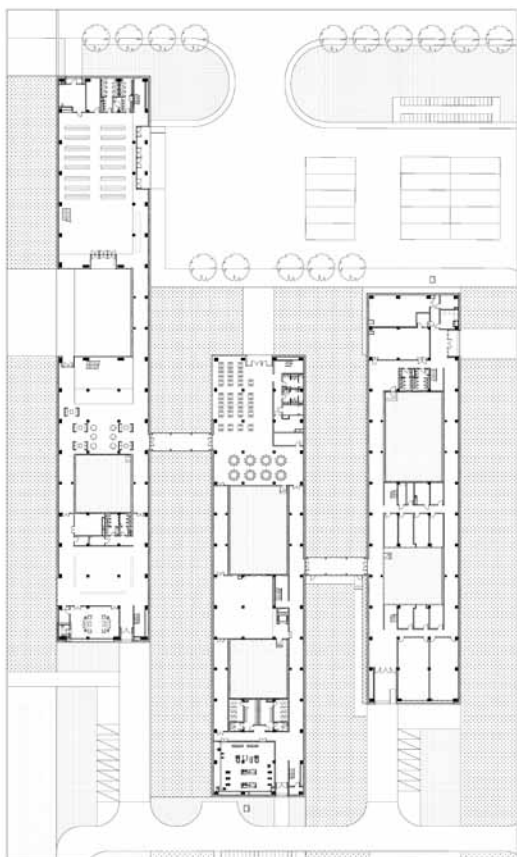


图4 一层平面图



图5 二层平面图

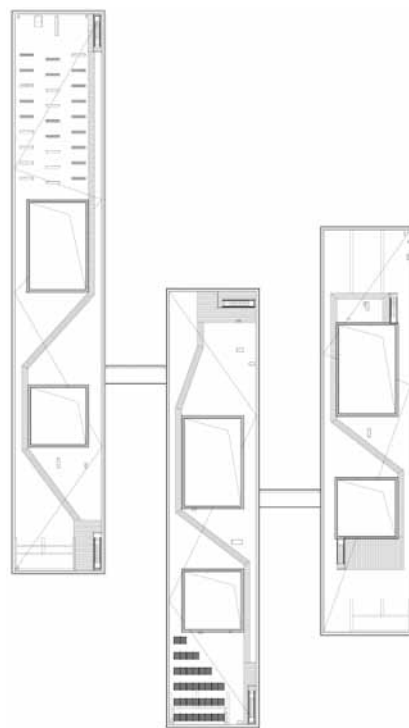


图6 屋顶平面图

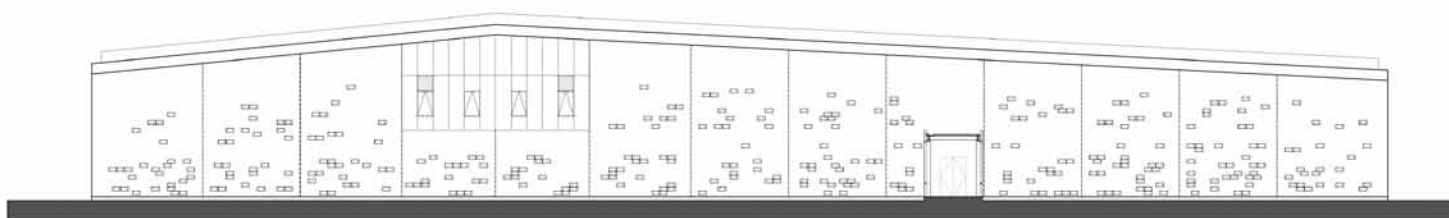


图7 立面图



图8 剖面图

1.2 夯土墙体的材料与建造技艺创新

1.2.1 关于砂石的选择

夯土墙体的原料大多就地取材，黏性较好、砂质较多的黄土（福建山区出产此类砂土较多）为最佳选择。但因东营市本地的砂土靠近黄河入海口，常年经河水冲刷颗粒较圆，强度很低，不宜作为夯土墙的主要原料。设计师转而在周边区域寻找合适的砂土样本，最后确定选用临近地区临朐的水洗黄砂，其优点为杂质较少且强度较高，非常适合作为夯土墙体的主料。

1.2.2 材料配比优化

水泥的加入使墙体较易达到高强度，防水剂则解决了传统夯土墙体耐久性差、经历雨水容易风化等问题。与现代常用的混凝土材料相比，该夯土墙体的原料配比在节能与可持续性上也具有优势：本墙体的力学性能（抗压强度25.4MPa）与C25混凝土接近（仅以抗压强度为主要指标），但其比C25混凝土在同等条件下可节约约13%的水泥用量，大大降低了对水资源、电能等的消耗，减少了对自然环境的负面影响。

1.2.3 墙体构造优化

本夯土墙体采用双层夹心墙体做法，总厚度500mm，在两片210mm厚的夯土墙体之间夹入80mm厚的聚氨酯板，以达到更好的保温效果（此夯土墙的传热阻 $R_0=3.72\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$ ）⁴。此外，墙体内部以纵横钢筋拉结成网（与传统夯土墙中的竹片筋作用相同），也解决了墙体抗裂与建筑物抗震等要求。这些构造上的优化也使得夯土技术与当代的建造体系能够很好地对接，为其在当代的广泛应用打下良好基础（图9，10）。

1.2.4 丰富的立面肌理

为强化夯土墙体在湿地景观中平缓而水平延伸的视觉效果，原料中加入铁黄、咖啡、铁红等不同颜料



图9 夯土墙细部



图10 施工现场



图11 施工现场使用的各类颜料



图12 不规则小窗洞在夯土墙体形成的特殊效果



图13 从游客接待大厅内部看夯土墙体丰富的立面肌理

（图11），并分层夯实。以主入口的景观墙为例，将整幅山水画融合于色彩渐变的夯土肌理中，形制同传统建筑中的照壁，寓意远山旷逸之境，此为传统夯土墙达不到的立面效果。此外，墙体上不规则分布的小窗洞（窗洞尺寸有三种：300mm×600mm、300mm×900mm、300mm×1200mm）与夯土自身肌理叠合在一起，形成了更为丰富的立面效果（图12，13）。

2 作为能量媒介的材料建构

除去对传统夯土建造技艺的借鉴与优化，本次夯土实验的另一着眼点则是如何通过设计策略更好地回应地域气候。在能源日渐稀缺的今日，可持续设计受到建筑师们的极大关注，而基于热力学理论的建筑实践则可看做对此话题的极好回应。热力学中关注的基本点在于能量（尤指热量）的转移过程。具体落实到建筑的设计实践中，最常见的包括如何通过建筑设计有效改善人体热舒适度、降低能耗，手段包括被动式太阳能系统、蓄热体、自然通风、直接式降温、间接式降温等。从图14~16中可以看到，蓄热体材料以及自然通风技术的运用可大大提高该项目所在区域的建筑室内的人体热舒适度。

2.1 夯土墙对室内热舒适度的有效提高

本实验中的夯土墙体是一种很好的蓄热体（thermal mass），其具有较高的体积热容（volumetric heat capacity），能够蓄积并释放热量。且其光滑致密的外表面在夏季还可一整天维持较低的表面温度，具有较好的隔热性能（图17）。影响室内热舒适度的指标主要包括温度、湿度等，而室内温度及湿度的相对稳定对人

图14 焓湿图（此数据为Autodesk Project Vasari软件测算结果）

（地点：山东省东营市；蓝线区域：适宜采用蓄热体外围护材料改善室内人体舒适度的温湿范围—干冷时效果最佳；红线区域：适宜采用被动式通风技术改善室内人体舒适度的温湿范围—湿热时效果最佳；黄线区域：体感最舒适的温湿范围。）

图15 采用蓄热墙体前后的室内热舒适度比较（此数据为Autodesk Ecotect Analysis软件测算结果）

（黄色为采用蓄热墙体前各个月份的室内热舒适度指数，红色为采用蓄热墙体后各个月份的室内热舒适度指数。如图可见，除去1月、2月、11月，在全年的大部分月份，采用蓄热墙体前后的对比均非常明显。）

图16 采用自然通风前后的室内热舒适度比较（此数据为Autodesk Ecotect Analysis软件测算结果）

（黄色为采用自然通风技术前各个月份的室内热舒适度指数，红色为采用自然通风技术后各个月份的室内热舒适度指数。如图可见，自然通风在春、夏季获得的效果非常好。）

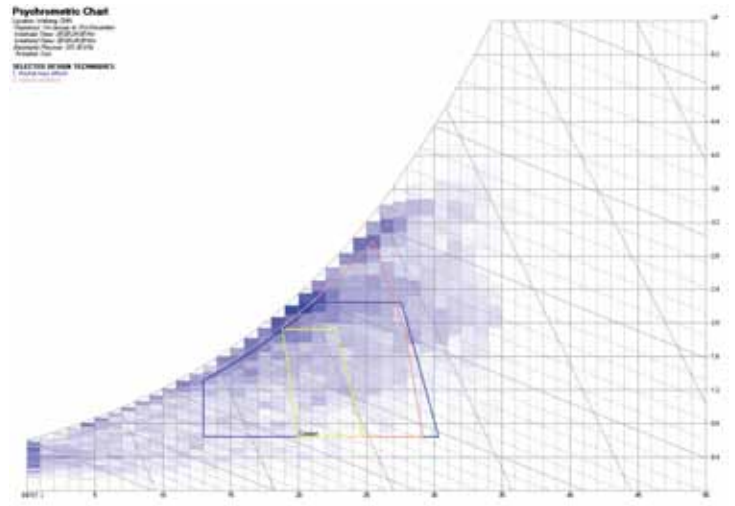


图14

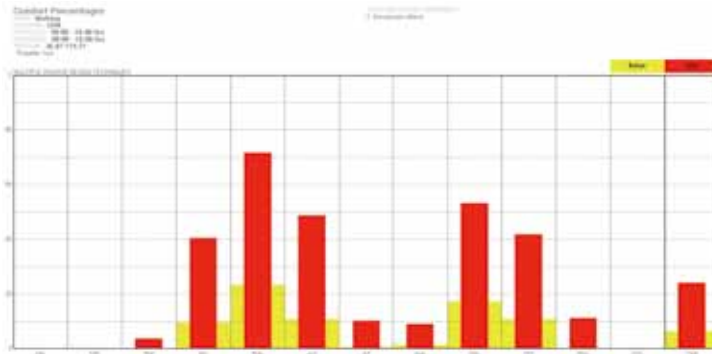


图15

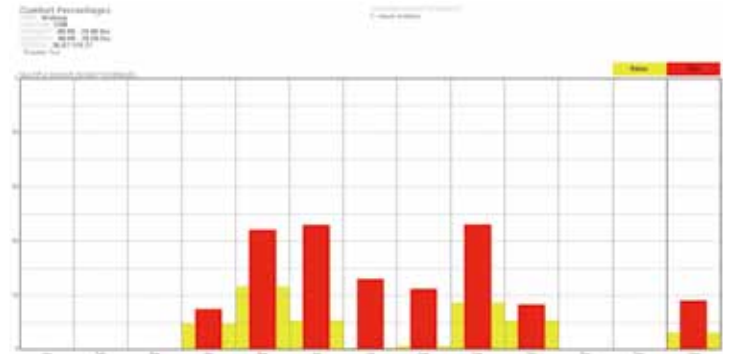


图16



图17 施工中的夯土墙体

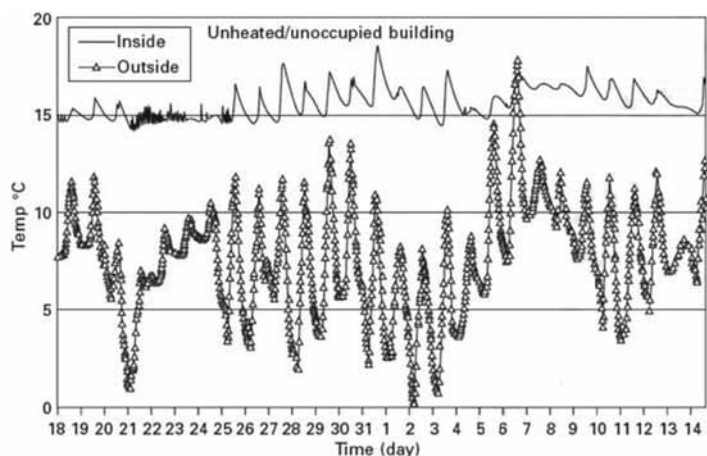


图18

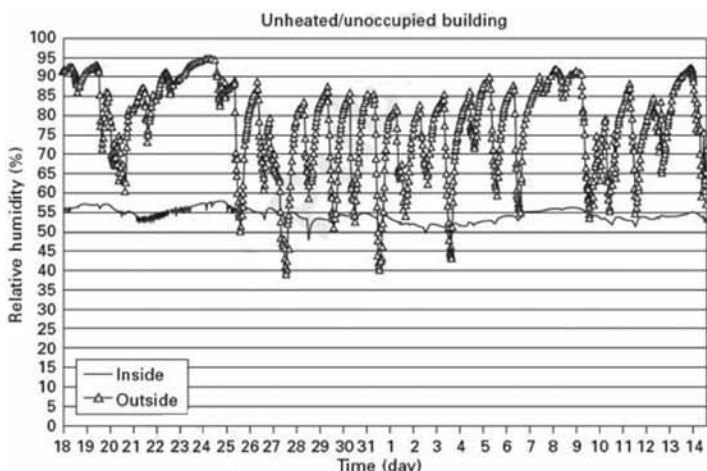


图19

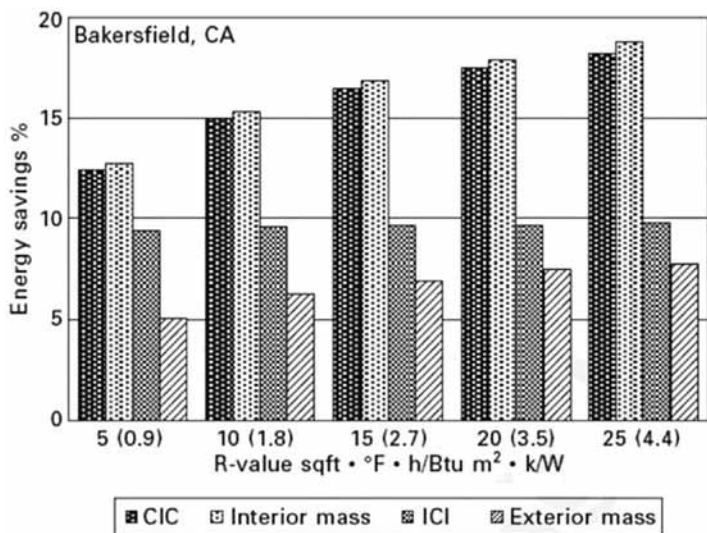


图20

图18 BCIT关于夯土墙体为北墙（无人房间）时的室内外温度对比研究（来源于文献[5]，P571）

图19 BCIT关于夯土墙体为北墙（无人房间）时的室内外湿度对比研究（来源于文献[5]，P571）

图20 不同形式墙体构造的节能效果（来源于文献[5]，P568）

图21 横向腔体示意图（左），竖向腔体示意图（中），横向腔体与竖向腔体结合通风（右）

图22 模拟夏季该地区开窗后自然通风情况（模拟对象为1号楼；此数据为Autodesk Flow Design软件测算结果；如图可见南北贯穿走廊以及庭院的存在，大大加速了风在建筑内部的流动，在夏季可有效提高室内热舒适度。）

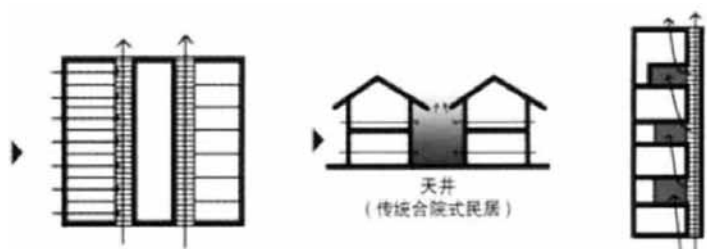


图21

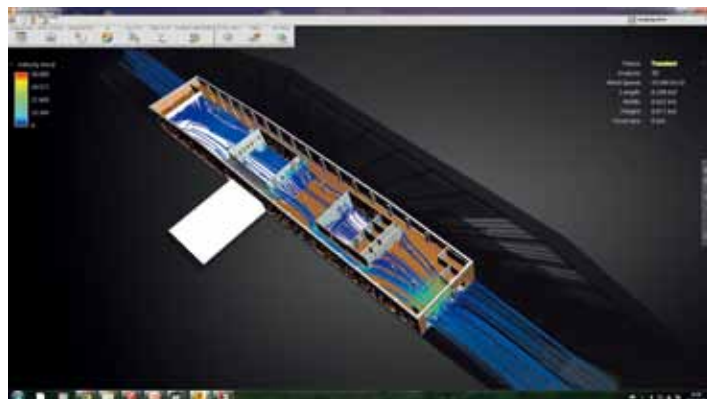


图22

的舒适度来说至关重要。加拿大不列颠哥伦比亚理工大学（BCIT）曾对此夯土墙体的室内热舒适度做过如下测试：其一，图18为夯土墙北面房间外墙（无人使用、无人工采暖情况下）的室内温度研究，研究表明，尽管室外昼夜温差在0~18℃之间波动，但室内的温度却能较为稳定地维持在15~19℃之间，可见此墙体的保温性能及热稳定性都非常之好。其二，图19为夯土墙北面房间外墙（无人使用、无人工采暖情况下）的室内湿度研究，可见室外的24小时湿度波动很大，基本在40%~95%之间，而室内湿度的稳定性却很好，基本维持在50%~55%之间，为体感最为舒适的室内湿度。

2.2 夹心墙做法（CIC）的节能优势

关于夯土墙的保温性能，美国橡树岭国家实验室（Oak Ridge National Laboratory）也进行过一系列的研究，其实验结果表明：外保温做法（Interior mass）及夹心墙做法（CIC）在节能方面比其他两种内保温做法（Exterior mass）以及内外保温做法（ICI）优越许多，⁵且随着传热阻 R_0 的增大，前两种做法的节能优势就愈发明显（图20）。如按本夯土墙体传热阻 $3.7\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$ 计算，则夹心墙做法比内保温做法要节能一倍多。而外保温节能效果虽然略优于夹心墙做法，但由于保温材料多为疏松质地，外保温对墙体外侧的防护能力差，且不能适应建筑外立面变化多样的装饰要求。尤其在多雨及多大风气候区域，容易引发墙体霉变、渗漏等通病。由此可见，夯土墙的“夹心”做法是最大程度节能且兼顾墙体耐久性、内外立面肌理效果的最优选择。

2.3 自然通风与空间设计

自然通风不论在传统还是现代都是降低能耗的节能策略，建筑内部缓冲腔体的存在可大大增强自然通风的效果。传统民居弄堂中的穿堂风便是利用风压通风的最好案例。而体量较大的建筑则可通过贯穿内部的横向腔体（如贯通的廊道）获得穿堂风。若将横向腔体与纵向腔体（如庭院）结合，则更能利用风压通风（图21）。^[2]本项目中的建筑内部空间设计、开窗位置及开窗大小就充分考虑了以上因素：贯通整个建筑的南北走廊可成为获得穿堂风的横向腔体，嵌入内部的庭院



图23 施工中的建筑内部空间

与走廊连接在一起，进一步加强了自然通风的效果。尤其在夏季，该地区以南风及偏南的东南风为主，主导风向与南北走廊方向接近，则更有利于利用风压进行自然通风（图22，23）。

3 结语

本次夯土试验，与其说是对传统建筑技艺的延续，不如说是一种“顺应环境”的设计策略，由此形成的建筑与湿地景观融为一体，成为了具有诗意的本体建构。而“热力学建筑”概念下的建筑实践也是工作室近年来长期关注的话题，对“自然与能量”议题的特别关注将突破单纯建造意义上的建造实践，带来更丰富、更富有挑战性的研究与实践机会。▲

注释

1 热力学是研究热现象中物态转变和能量转换规律的学科，着重研究物质的平衡状态以及准平衡态的物理、化学过程（此名词解释基于<http://zh.wikipedia.org>中对于热力学的介绍）。热力学在建筑设计中的应用主要关注的是热量的转移，其最基本的方式包括传导、对流以及辐射三种方式。

2 此数据来源于维基百科（<http://zh.wikipedia.org>）对于夯土的性质介绍。

3 此数据为本夯土墙体进行多次试块实验后得出的数据，试块大小150mm×150mm×150mm。

4 此数据来源于A00建筑事务所对本夯土墙体的相关测算数据。

5 Interior Mass—Exterior thermal insulation, interior mass（外保温做法）；Exterior Mass—Interior thermal insulation, Exterior Mass（内保温做法）；CIC—Exterior mass, core thermal insulation, interior mass（夹心墙做法）；ICI—Exterior insulation, core mass, interior thermal insulation（内外保温做法）。

参考文献

- [1] 陈小瑾. 潮汕地区传统建筑典型墙体营造技术[D]. 华南理工大学硕士学位论文, 2006.
- [2] 陈晓扬, 仲德崑. 被动式节能自然通风策略[J]. 建筑学报, 2011(9).
- [3] 诺伯特·莱希纳. 建筑师技术设计指南——采暖·降温·照明[M]. 张利等译. 建筑工业出版社, 2004.
- [4] 卡桑德拉·亚当斯著, 李杨译. 美国的创新性建筑材料和建造方式[J]. 生态城市与绿色建筑, 2010(1).
- [5] Matthew R.Hall, Rick Lindsay and Meror Krayenhoff. Modern Earth Buildings: Materials, Engineering, Construction and Applications[M]. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012.

项目地址：山东省东营市

客户：东营市旅游开发有限公司

项目设计：同济大学建筑设计研究院（集团）有限公司麟和工作室

建筑师：李麟学，刘旻，李欢欢，王瑾瑾，柯纯建

设计顾问：A00建筑事务所（夯土墙体部分）

建筑面积：9 900m²

设计时间：2012~2014

摄影：张嗣烨