

迪拜哈利法塔的幕墙

撰文 赵西安 中国建筑科学研究院

总高度/混凝土结构高度: 828m/601m
基础底面埋深/桩尖深度: 30m/70m
全部混凝土用量: 330 000m³
总用钢量: 104 000t (高强度钢筋65 000t, 型钢39 000t)
有效租售楼层: 162层
总建筑面积/塔楼建筑面积: 526 700m²/344 000m²
塔楼建筑重量: 50万t
可容纳居住和工作人数: 12 000人
总造价: 15亿美元
工期: 2004年9月~2010年1月, 总计1 325天
工程总包: 韩国三星
土建承包: 江苏南通六建
幕墙承包: 香港远东、上海力进、陕西恒远
建筑设计、结构设计: SOM

1 工程概况

迪拜哈利法塔是目前世界上最高的建筑,也是我国幕墙技术人员和工人施工安装的最宏大的幕墙工程。它是一座综合性建筑,37层以下是阿玛尼高级酒店;45~108层是高级公寓,共700套,78层是世界最高楼层的游泳池;108~162层为写字楼;124层为世界最高的观光层,透过幕墙的玻璃可以看到80公里以外的伊朗;158层是世界最高的清真寺;162层以上为传播、电信、设备用楼层,一直到206层;顶部70m是钢桅杆(图1,2)。

为保持世界最高建筑的地位,钢结构顶部设置了直径为1 200mm的可活动的中心钢桅杆,可由底部不断加长,用油压设备不断顶升,其预留高度为200m(图3)。为此哈利法塔始终不宣布建筑高度。到2009年底,确认5年内世界各国都不可能建成更高的建筑,才最后确定828m的最终高度。

2010年1月4日,哈利法塔举行了开幕式,正式宣布建成。



图1 哈利法塔立面

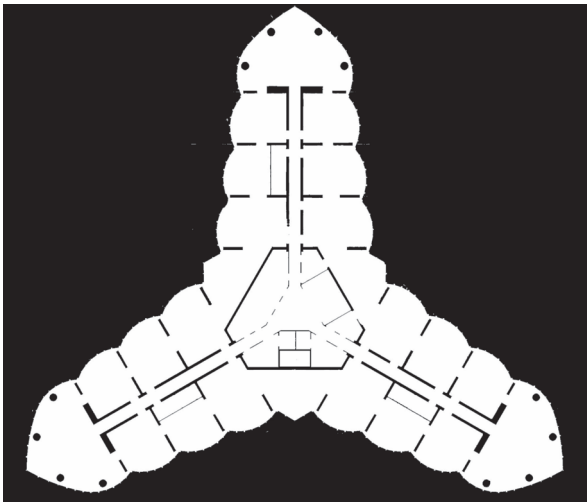


图2 哈利法塔平面



图3 顶部可升高的钢桅杆

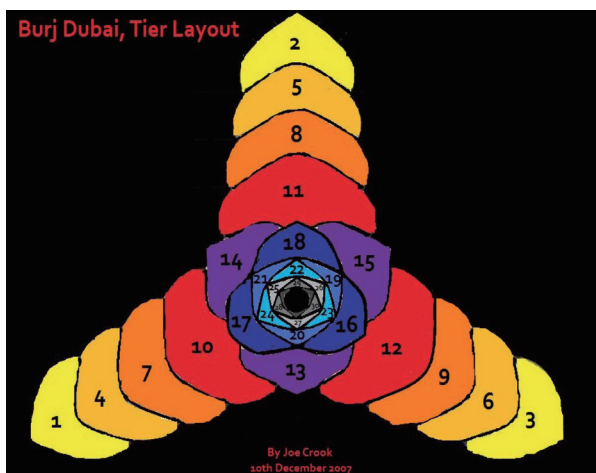


图4 三瓣盛开的沙漠之花



图5 蔚蓝天空下幕墙熠熠生辉

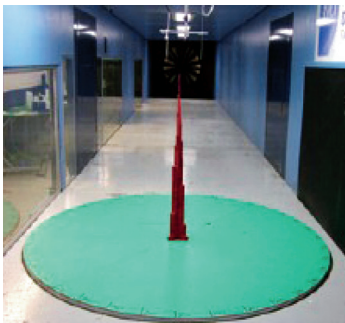


图6 RWDI边界层风洞, 1/500模型



图7 1/125 大比例模型

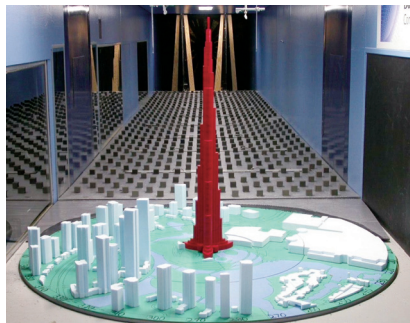


图8 风环境试验



图9 测点的导压管

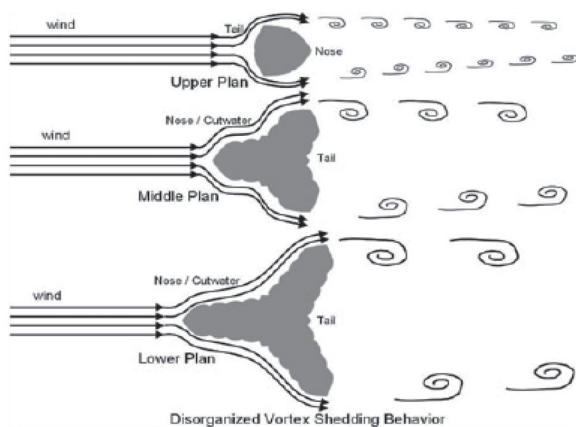


图10 沿高度的气流分布

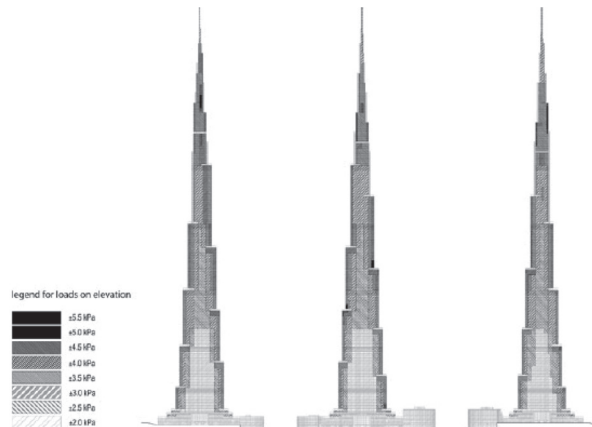


图11 建筑物风压分布

2 建筑幕墙

哈利法塔的建筑理念是“沙漠之花（Desert Flower）”，平面是三瓣对称盛开的花朵（图4）；立面通过21个逐渐升高的退台形成螺旋线，整个建筑物像含苞待放的鲜花。这朵鲜花在沙漠耀眼的阳光下，发出蔚蓝色的光辉，这就是她的玻璃幕墙（图5）。

哈利法塔的建筑幕墙总面积为13.5万 m^2 ，其中塔楼部分为12万 m^2 。在塔楼幕墙中，玻璃10.5万 m^2 ，不锈钢板1.5万 m^2 ，相当于17个足球场面积。采用单元式幕墙，共有23566个单元板块。

幕墙由香港远东公司承建（该公司1998年由航天部收购），转交上海力进和陕西恒远，380余名中国技术工人进行幕墙安装。从2007年5月开始，到2009年9月完工，历时30个月。开始一天只能安装20~30个单元，最后每天最多可达175个单元。

幕墙总造价约为人民币8亿元，约为6000元/ m^2 。

3 风洞试验

进行了40次以上的风洞试验，为主体结构设计和幕墙设计提供技术依据。风洞试验在加拿大安大略RWDI边界层风洞进行。风洞尺寸为2.4m×1.9m和4.9m×2.4m。分别进行了刚性模型的力平衡试验和弹性模型的多自由度试验。按50年一遇的风力，做了风压分布、风环境、风气候等方面的研究。模型测点1140个（图6~11）。



图12 风力作用下的位移



图13 幕墙的视觉模型



图14 四性试验（左）和飞机头吹风试验（右）

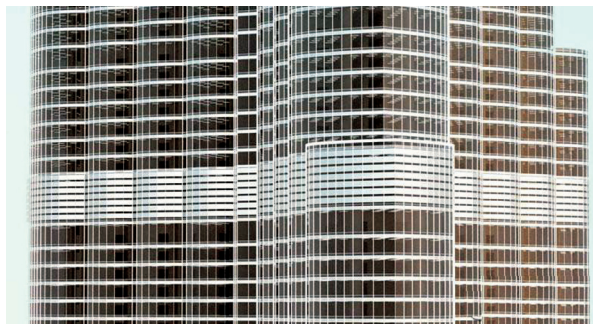


图15 塔楼幕墙的单元划分

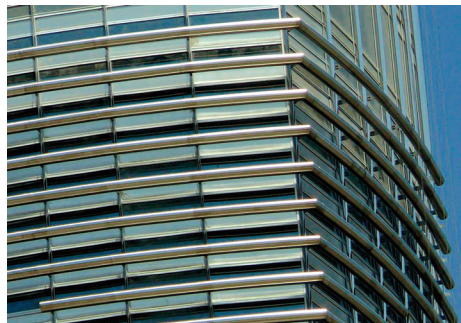


图16 设备层的不锈钢装饰条



图17 标准层单元幕墙内观



图18 124层观光层幕墙

4 幕墙系统

4.1 环境条件

迪拜位于中东沙漠地带，环境条件恶劣，气温范围为 $2^{\circ}\text{C}\sim 54^{\circ}\text{C}$ ，材料表面最高温度 82°C ，气候干燥，多沙尘。

4.2 设计标准

设计标准为：1）风力：50年一遇， 55m/s ，风压按风洞试验取值；2）地震：按美国标准 UBC97 的 2a 区，地震系数 $z=0.15$ ，相当于我国 8 度设防；3）结构水平位移：50 年一遇风力，828m 顶部 1450mm，办公层顶部 1250mm，公寓层顶部 450mm（图 12）；4）结构竖向压缩：每层平均 4mm，整座建筑的顶点 650mm。设计前，专门制作了视觉模型（图 13）。

4.3 幕墙试验

进行了 5 个幕墙足尺试件的四性试验和飞机头风力试验（图 14），测试了气渗、水渗、风压变形、平面内变形、温度循环。5 个试件的试验表明：幕墙满足哈利法塔的要求。对设备层幕墙单独进行了专门的试验。

5 塔楼幕墙

5.1 材料

（1）玻璃为中空玻璃，16mm 空气层，两片超白玻璃。外片镀银灰反射膜；内片镀 Low-E 膜。两膜均朝向空气层。可见光透射率 20%；综合热透射率 16%。山东金晶玻璃公司生产。

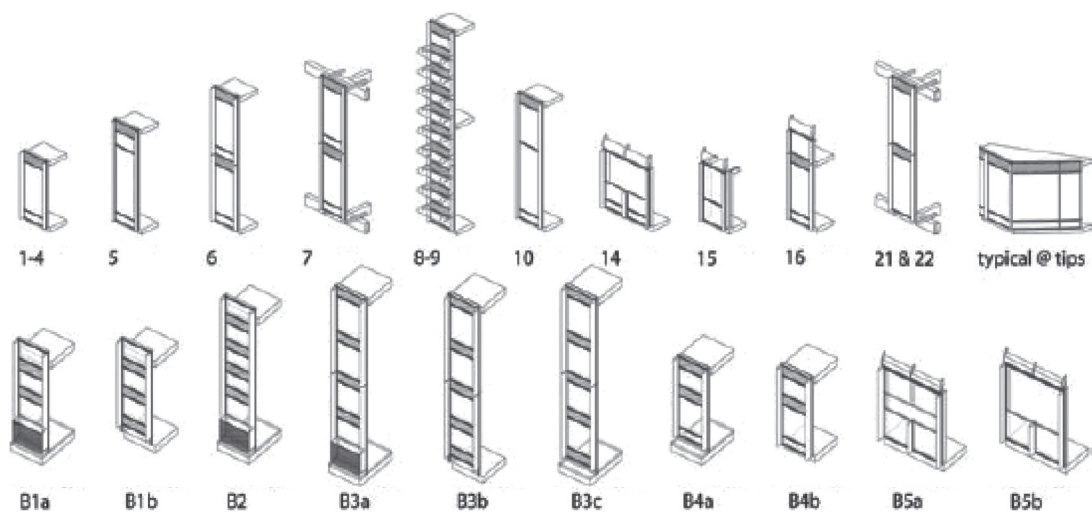


图19 塔楼幕墙主要板型

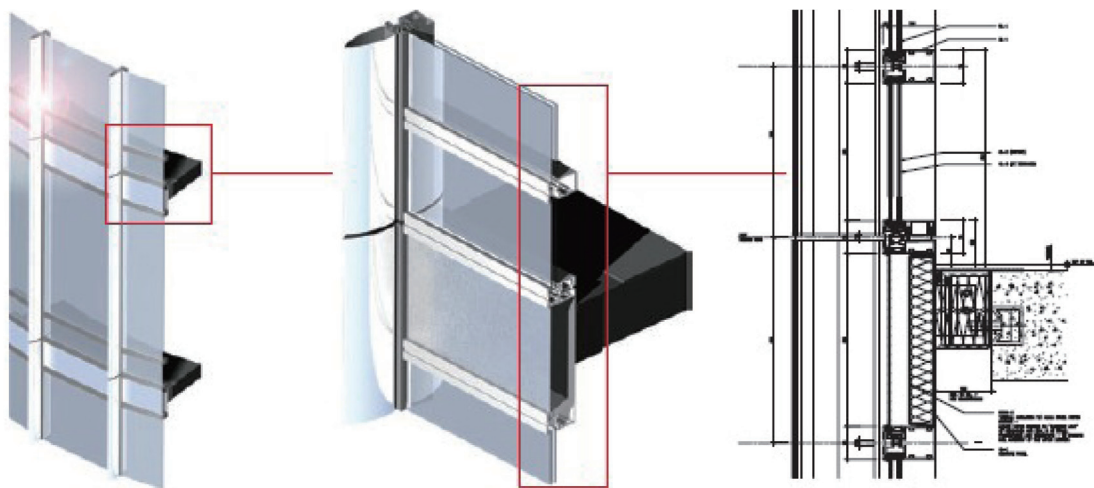


图20 塔楼单元幕墙竖向剖面

(2) 铝型材主要杆件 6063-T5, 6063-T6, 连接件 6061-T6, 最大截面 300mm。可见表面氟碳喷涂, 不可见表面阳极氧化。共 2 600t, 由广东兴发铝材厂生产。

(3) 不锈钢板用于窗下墙的一部分。

(4) 不锈钢材用于竖向装饰条和设备层水平装饰条。

(5) 五金件由广东坚朗公司生产。

5.2 板型

单元板块有 21 种主要板型, 尺寸由 1.3m×3.2m 到 2.25m×8m (图 19)。

5.3 安装

楼板为 300mm 厚混凝土板, 单元板块吊挂件埋在楼板边缘。标准楼层层高 3.2m, 板块直接连接在预埋挂件上。设备层层高较高, 后面另加铝型材立柱 (图 21~26)。

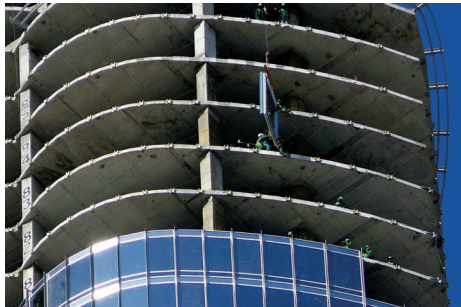


图21 吊挂件预埋在楼板边缘

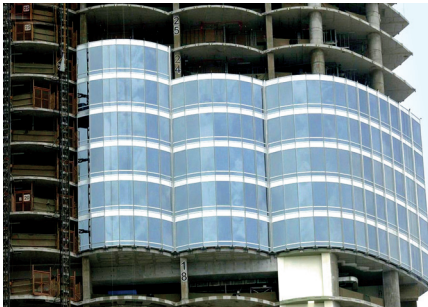


图22 标准层板块直接挂上楼板

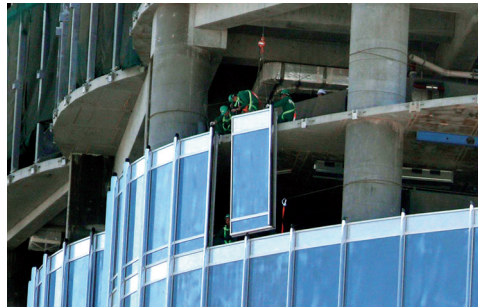


图23 单元板块吊装到挂件上



图24 设备层较高，另加铝立柱

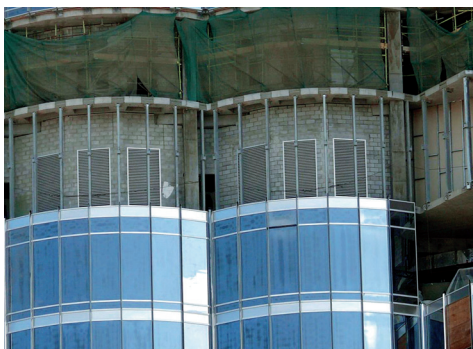


图25 设备层幕墙安装

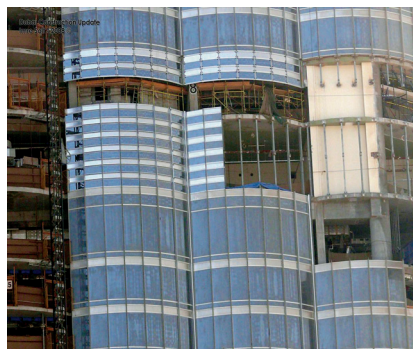


图26 幕墙局部



图27 入口处设置玻璃大厅



图28 大厅双圆柱外形双层通风幕墙

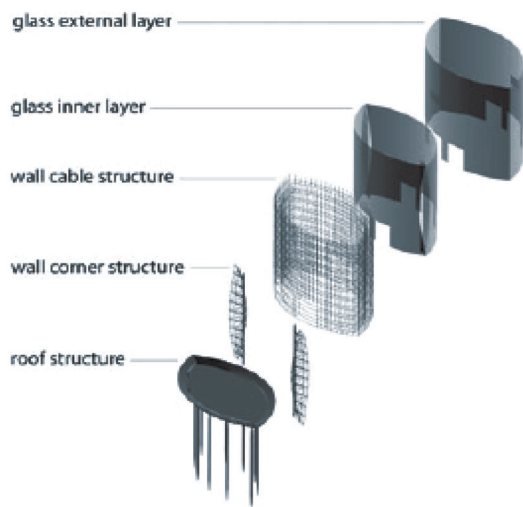


图29 索网幕墙的组成部分

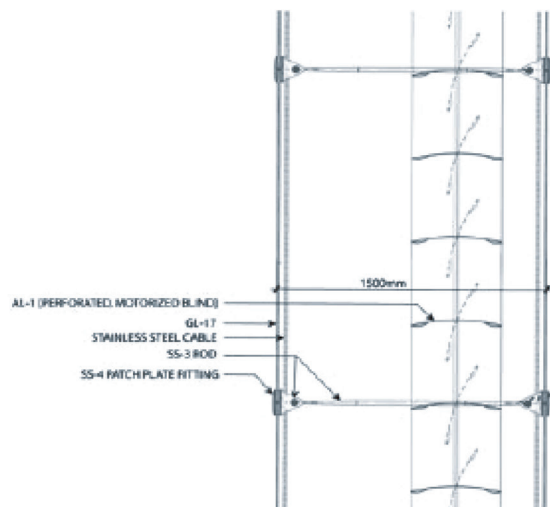


图30 内外幕墙之间设撑杆和遮阳板

6 入口处索网双层幕墙系统

三个入口处设入口大厅，周边均由索网双层幕墙封闭（图 27，28），分别用于酒店、公寓、写字楼。建筑要求幕墙极度通透。白天阳光可以照射，晚上灯光可以透出，因此要求玻璃尽量大，支承结构尽量小，所以选用索网玻璃幕墙。迪拜温度极高，为做到透光不透热，做双层通风幕墙，内外幕墙均用索网（图 29）。

两道幕墙均为圆柱形，竖向为直线，水平是圆弧。竖索上端拉在顶部楼板梁上，下端拉在地梁上，中间由多道水平方向的钢圆弧梁支承。水平索两端拉在角部刚性竖向钢桁架处，由水平方向圆弧梁和圆弧状分布的竖索来保持水平索的圆弧形状。所有索均采用不锈钢绞线。

内外两道索网相距 1 500mm，由水平放置的不锈钢杆支撑来保持这个距离（图 30），这个空间便是能通风的热通道。

采用低铁超白玻璃。玻璃四角由夹板支承，夹板位于不锈钢支撑杆的端部。

在两道幕墙之间的热通道中设有电动金属遮阳板，遮阳板的开启、关闭及开启角度由电脑控制。透过



图31 热通道的气流



图32 清洗设备



图33 伸臂最长可达20m

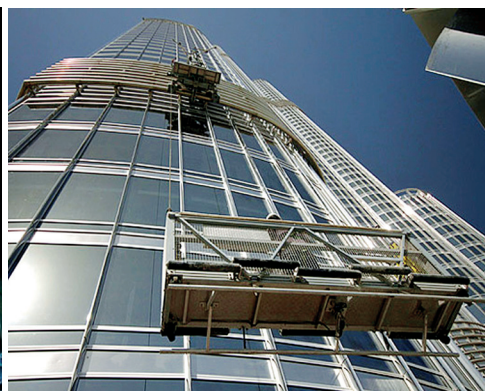


图34 清洗机的吊篮

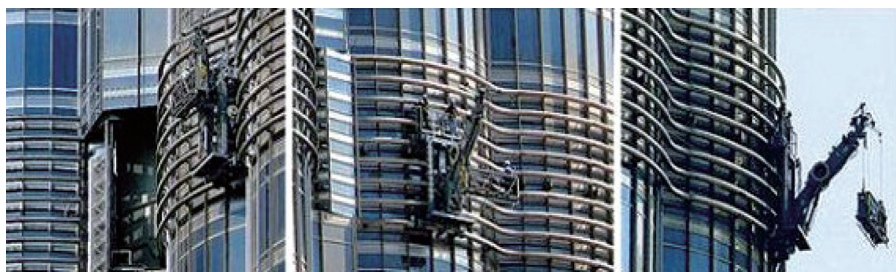


图35 清洗机在设备层行走，左图可见储存机器的“机窝”



图36 哈利法塔开幕式（2010.1.4）



图37 哈利法塔遇雷击，安然无恙（2010.1）

外幕墙进入室内的辐射热被内幕墙阻挡，集中在热通道内，由抽风机排出室外（图31）。

SOM 公司对冷凝问题进行了详细计算，表明一年间出现结露的时间不多，冷凝水量并不大。

7 清洗设备

由于迪拜的气候条件差，高温、高湿、灰尘，使清洗设备的工作环境很差。13 万 m^2 的巨大幕墙面积，21 个不同高度的退台和立面形状的不断变化，828m 的超高，都使得清洗幕墙十分困难。

设置了 18 台擦窗机和固定伸臂，其外伸长度可达 10~20m，这些设备不用时可以隐藏起来。18 台设备、36 个工人，全部清洗一遍要 2~3 个月。图 32~35 为清洗设备。

8 小结

迪拜哈利法塔以 828m 的高度、13 万 m^2 的大面积单元幕墙，给我们提供了丰富的设计和施工经验。随着国内 632m 的上海中心、680m 的深圳平安保险大厦等一批 600m 以上建筑的幕墙即将设计施工，我国的幕墙技术将会提高到一个新的水平。■