



高层建筑幕墙的新结构和新系统

撰文 赵西安 中国建筑科学研究院

摘 要 目前，高层建筑的幕墙高度向上延伸，承受更大的风压、地震力和温度作用，因而采用多种多样的面板材料和新的构成形式；为适应绿色低碳的要求，新的幕墙体系如双层幕墙和光伏幕墙在超高层建筑中得到应用。本文主要介绍一些新型高层建筑幕墙。

关键词 高层建筑 建筑幕墙 幕墙支承结构 光伏幕墙 双层幕墙

1 高度400m以上的建筑全部采用玻璃幕墙

据笔者不完全统计，目前设计、在建和建成高度 400m 以上的超高层建筑的数量大约如表 1 所示。

表 1 超高层建筑数量统计

高度	全部	中国内地	港澳台
600m 以上	28	14	0
500m 以上	45	26	1
400m 以上	94	62	3

部分高度 600m 以上的建筑见图 1~9。这些工程如同国内外所有超过 400m 的建筑一样，都采用玻璃幕墙作为外围护结构。超高层建筑外围护结构之所以采用玻璃，是因为玻璃同时具备透光、高强、轻质、耐久四大特点，而这是其他材料无可代替的。

玻璃透明，因此玻璃幕墙可以满足建筑采光和建筑艺术的要求；玻璃的抗压强度可达 $300\text{N}/\text{mm}^2$ ，抗拉强度可达 $150\text{N}/\text{mm}^2$ ，除钢材外，其他建筑材料难以相比；玻璃几乎不受大气的腐蚀，无须任何防腐措施。更为可贵的是，幕墙玻璃的厚度很小，超高层建筑中所用的玻璃通常单片厚度不超过 10mm，中空玻璃两片总厚度不超过 20mm，双夹胶中空玻璃的总厚度不超过 40mm。这样一来，幕墙结构包括玻璃和金属支承结构的总重量约为 $35\sim 120\text{kg}/\text{m}^2$ ，远小于普通填充墙的重量。超高层建筑玻璃幕墙的重量通常只占建筑总重量的 $1/100\sim 1/120$ 。上海环球金融中心（高度 495m）的总重量为 80 万 t，玻璃幕墙重量为 5 000t，占 $1/160$ 。如改为其他更重的外围护结构，就会使墙、梁、柱、桩截面随之加大，不仅重量将增加 20 万 t，地基设计施工更为困难。



图1 沙特王国大厦1600m，设计



图2 美国迈阿密975m，设计



图3 中国青岛777m，设计



图4 印度孟买塔725m，在建



图5 首尔传媒塔640m, 在建

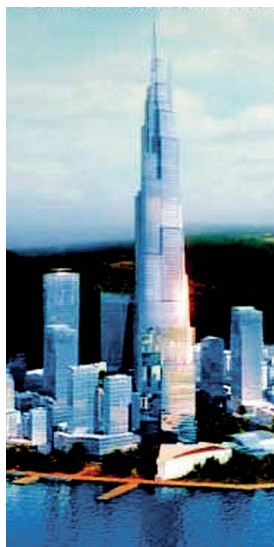


图6 中国珠海十字门
700m, 设计



图7 深圳平安金融中心
645m, 在建



图8 武汉国际金融中
心636m, 在建

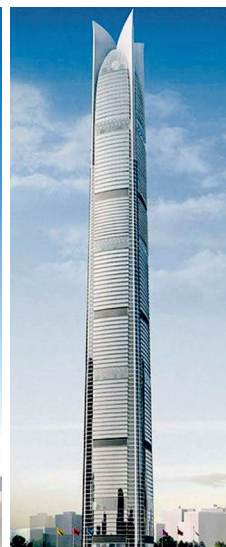


图9 天津117大厦
600m, 在建



上海港务大楼



杭州浙江日报大楼



伦敦再保险公司



卡塔尔多哈, 阿尔比达塔, 三向杆系结构



日本名古屋, 站前螺旋大厦

图10 采用三向杆件网络结构的玻璃幕墙

目前正在设计的沙特王国大厦(高度1 600m), 玻璃幕墙的重量为建筑总重量的1/100。可以说如果不采用玻璃幕墙, 这样的超高层建筑是难以实现的。

2 幕墙新结构

2.1 网格体系

通常高层建筑幕墙的支承结构采用正交梁柱金属框架系统。随着建筑功能和建筑艺术要求的多样化, 新的结构形式得到更多的应用, 如三向斜交网格系统应用相当广泛(图10)。此外六边形是可以填满平面的几何图形之一, 因此六边形网格钢结构也常用于幕墙(图11)。



图11 六边形蜂巢幕墙钢结构

2.2 刚架体系

由钢筋混凝土或钢构件刚性连接成为平面刚架或空间刚架可作为幕墙的支承结构体系（图 12，13），由金属构件和金属面板可以构成变形的刚架式幕墙表皮结构（图 14，15）。

2.3 索网结构

索网结构是有预拉力的拉索体系，对玻璃幕墙遮挡最小，深受建筑师欢迎。索网的拉力要作用在主体结构上，主体结构设计时应预加考虑。索网在大挠度下工作，通常控制挠度为跨度的 $1/40 \sim 1/60$ 。北京新保利大厦高 160m，索网晶面形， $90\text{m} \times 70\text{m}$ ，是目前世界最大的单片索网玻璃幕墙（图 16），两根主索由 150 根直径 15.2mm 的钢绞线组成，拉力达 39 000kN。



图12 迪拜阿尔法塔幕墙由空间刚架支承



迪拜O14地块塔楼的变形刚架支承系统



西班牙太阳塔的空间刚架支承系统

图13 钢筋混凝土构件刚架系统



图14 北京康拉德酒店仿长颈鹿皮毛花纹金属幕墙



图15 罗马尼亚布加勒斯特仿植物花穗金属幕墙

现在索网幕墙已在工程中广泛应用，部分项目见图 17~20。

3 各种面板材料广泛应用

由于玻璃无可代替的优点，400m 以上超高层建筑幕墙的面板采用玻璃的趋势短期内不会改变，但同时金属板也得到局部应用，以满足不同建筑风格和建筑艺术的要求。400m 以下的高层建筑除大量采用玻璃幕墙外，金属和石材幕墙也得到较多应用。玻璃幕墙的一些新工程见图 21。



图16 北京新保利大厦索网结构支承玻璃幕墙



图17 北京中关村文化商厦，索网70mX29m，横索34mm，竖索24mm



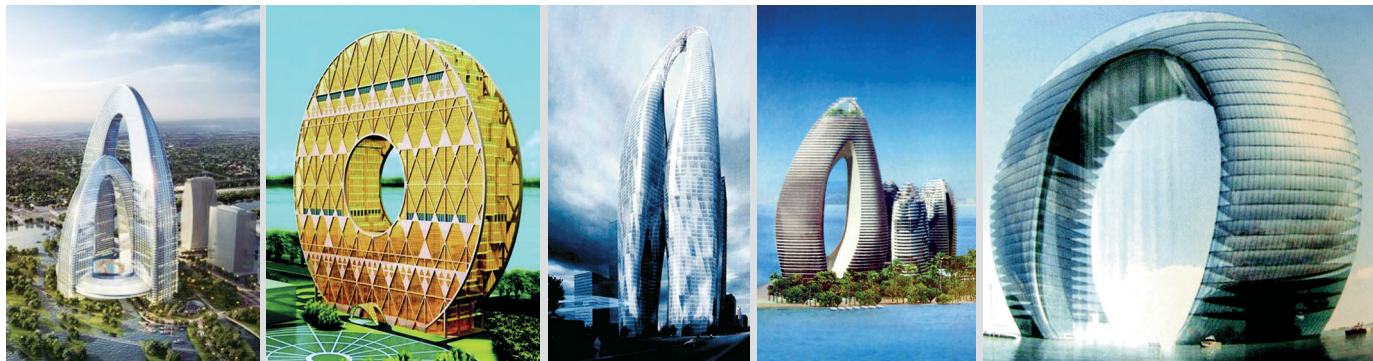
图18 克拉玛依石油指挥中心，索网90mX22m，位于山口，风荷载标准值高达 0.95kN/m^2



图19 天津泰达市民中心，锥体高度160m



图20 北京中国青年旅行社总社



北京通州彩虹门，高度295m

广州塑料交易中心，金色玻璃，直径147m，33层

广州800，高度400m

三亚凤凰岛，高度200m

无锡太湖明珠酒店

图21 一些新的玻璃幕墙工程



图22 吉隆坡石油双塔，480m



图23 非透光部分采用铝板和不锈钢板墙面



图24 天津中钢大厦，高度303m

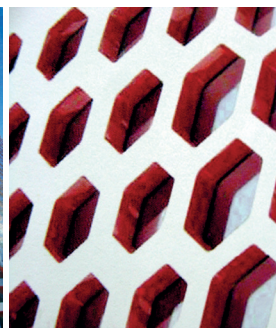


图25 幕墙钢板和外围主体钢柱组合为统一的外墙



图26 纽约比克曼大厦波浪形起伏的不锈钢幕墙

金属板也是常用的材料之一。吉隆坡石油双塔高 480m，幕墙中造型复杂的非透光部分采用了容易成型的铝板和不锈钢板，银光闪闪（图 22，23）。

天津钢铁大厦的钢板幕墙充分反映了钢铁材料的特色，不同规格的六边形窗孔在墙面上自然形成明暗相间的条纹。幕墙钢板与外围主体结构合二为一，整个外墙既是承重结构，又是围护结构（图 24，25）。

不锈钢板在超高层建筑中常常非常规使用，图 26 为纽约比克曼大厦的波浪形曲面不锈钢幕墙。

1930 年纽约洛克菲勒大厦建成，花岗岩幕墙一举突破 300m 的高度。此后陆续建成了大量 300m 以



图27 纽约帝国大厦, 381m, 1931



图28 芝加哥阿莫科大厦, 346m, 1973



图29 纽约克莱斯勒大厦, 319m, 1930



图30 洛杉矶第一洲际大厦, 310m, 1990



图31 AL HAMBRO大厦, 412m

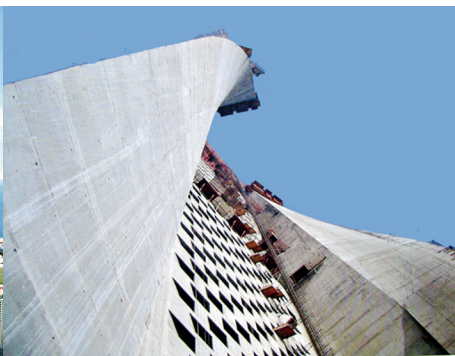


图32 AL HAMBRO大厦侧边混凝土墙面曾考虑过采用石板



图33 横滨里程碑大厦, 298m



图34 东京市政厅, 260m



图35 高雄动帝士大厦, 378m



图36 广州广晟大厦, 313m, 石材幕墙高280m



图37 广州银行大厦, 石材幕墙高260m

上的石材幕墙工程, 1931年建成的纽约帝国大厦石材幕墙高达381m, 稳居世界最高已经80年(图27~30)。

科威特AL HAMBRO大厦主要为玻璃幕墙, 设计时准备在两侧采用石材幕墙, 高达412m(图31, 32)。后考虑到曲面不容易拟合, 又有倒挂石板, 实际施工时改为马赛克薄板, 因而没有突破帝国大厦381m石材幕墙高度的记录。

历次地震尤其是2008年汶川大地震表明, 按照规范进行设计和施工的石材幕墙都经受了地震的考验, 抗震性能良好。日本横滨的里程碑大厦(298m)和东京市政厅(260m)曾经历1995年阪神大地震, 2011年3月11日又经历东日本大地震, 但其花岗岩复合幕墙无任何震害(图33, 34)。我国台湾高雄东帝士大厦378m, 采用花岗岩幕墙, 也经受住了1999年9月21日大地震的考验(图35)。



图38 广西北海，北部湾一号，异型石材幕墙最高 200m



图39迪拜帆船酒店，321m



图40 膜材紧绷在水平钢结构上

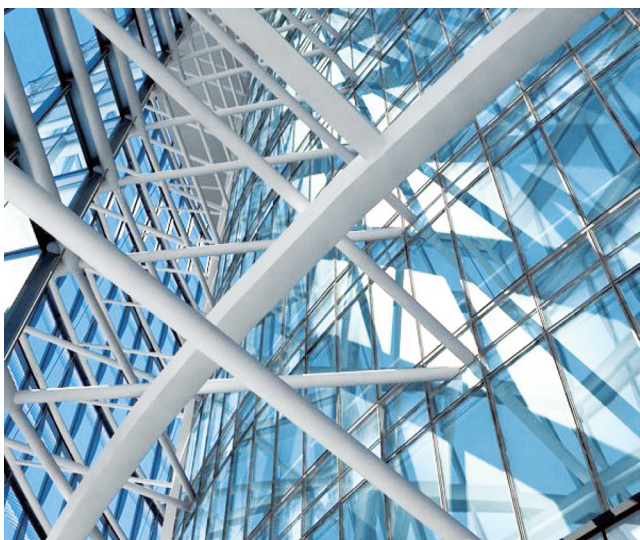


图41 上海中心外幕墙（左）与内幕墙（右）间



图42 名古屋站前大厦双层幕墙

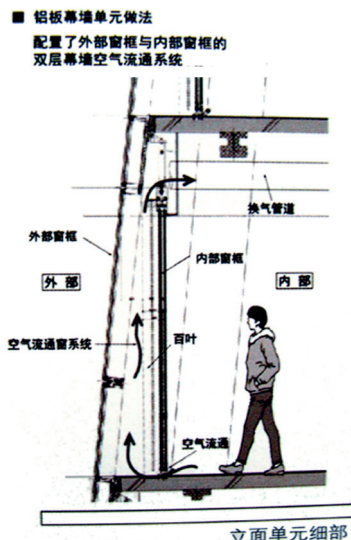


图43 内循环通风幕墙剖面的钢管支撑



图44 广州珠江城，绿色建筑

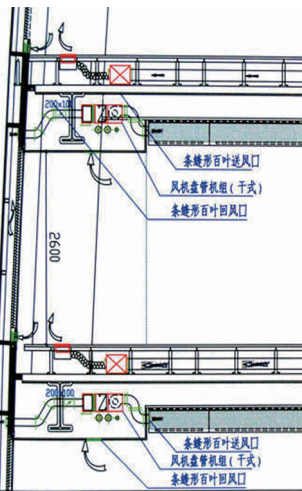


图45 内循环通风幕墙



图46 通风幕墙竖向剖面

我国内地目前最高的花岗岩幕墙是广州广晟大厦，建筑高度313m，石材幕墙高度280m，采用铝合金梁柱（图36）。其次是260m高的广州银行大厦，采用焊接钢结构支承（图37）。

广西北海北部湾一号工程的石材幕墙模拟广西的山水，轮廓起伏，带有溶洞。酒店幕墙最高达200m（图38）。

迪拜帆船酒店高达321m，采用张拉膜作为外幕墙，半透明的外围护材料使室内光线柔和、富丽堂皇，张拉膜绷紧在两层一道水平拱梁上（图39，40）。

4 双层通风幕墙和光伏幕墙

双层通风幕墙在超高层建筑中已得到应用。632m高的上海中心采用了间距很大的两道玻璃幕墙，



图47 水平遮阳板光伏组件

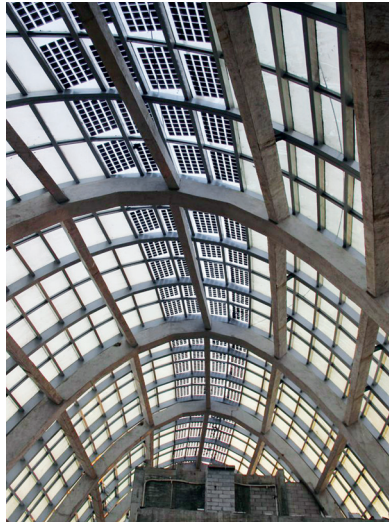


图48 顶部穹顶光伏发电



图49 顶部安装的合一式光伏组件

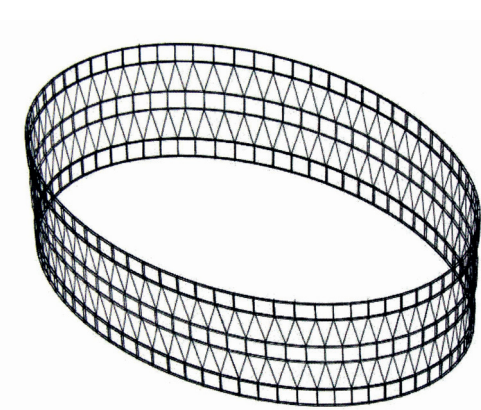


图50 广州塔幕墙标高440~450m
部分为光伏幕墙

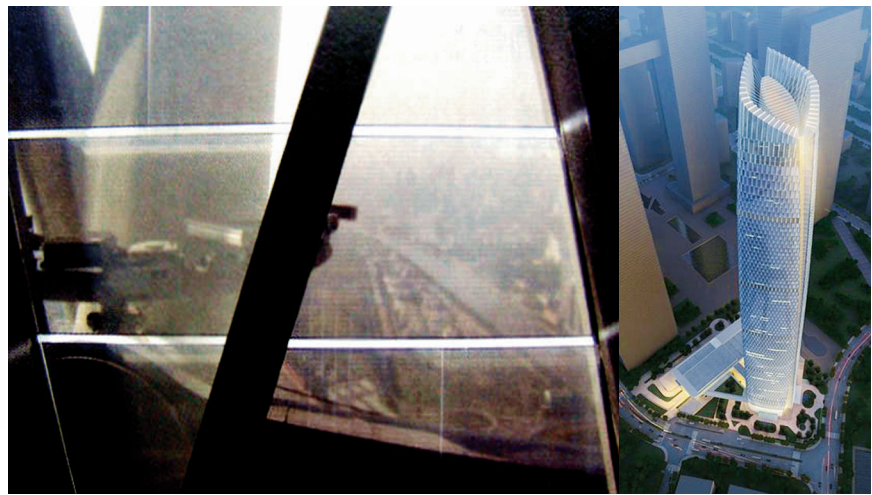


图51 采用弱光能发电的半透明薄膜组件 图52 武汉中心408m，
光伏双层幕墙

外幕墙由钢管吊杆悬挂在水平钢结构上（图 41）。日本名古屋站前大厦为螺旋形外玻璃幕墙，采用内循环通风系统（图 42，43）。

广州珠江城高度 303m，同时具有双层通风幕墙、光伏采光顶、光伏遮阳板和风力发电装置，是一座典型的绿色建筑（图 44）。幕墙立面分为三段，各段之间的空间安装了两组轴流式风力发电机。内外幕墙之间的空间为内循环的热通道（图 45），空气由架空地板抽出，经过热通道进入吊顶内的回风管，再返回架空地板，如此循环反复，大大改善了室内的工作环境（图 46）。珠江城山墙各层水平遮阳板均为光伏玻璃（图 47），顶部拱形部分也安装了光伏组件（图 48，49）。

广州塔玻璃幕墙最高部分（440~450m）为光伏幕墙，这是目前世界最高的光伏幕墙（图 50）。由于光伏组件 360° 布置，且幕墙位于钢立柱之内，遮挡较多，为适应弱光下的发电要求，采用了薄膜发电组件（图 51）。

正在施工的武汉中心高度 408m，88 层，双层幕墙。外幕墙为光伏幕墙，为争取最佳朝向，采用锯齿形非平整玻璃墙面（图 52）。

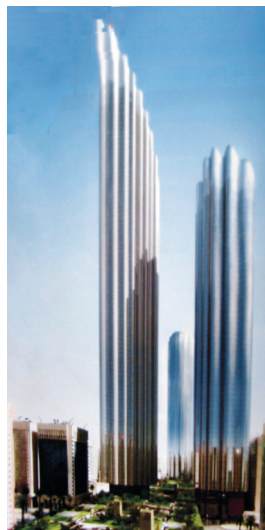


图53 阿联酋阿布扎比中央市场光伏幕墙



图54 首尔韩国行业总会办公楼，墙面和屋面均安装光伏组件



图55 墙面光伏组件倾斜30°



图56 曼彻斯特合作保险大厦



图57 阿联酋阿布扎比 CMA TOWER, 385m

阿联酋阿布扎比中央市场光伏幕墙 $5\,533\text{m}^2$ ，功率 452kW （图 53）。

韩国首尔全国行业总会办公楼的玻璃幕墙分层倾斜 30° ，安装光伏组件；屋面光伏组件倾斜 10° ，都是为了取得最佳的发电效率（图 54，55）。

英国曼彻斯特合作保险大厦的光伏幕墙采用了 $1\,700$ 块光伏单元板块（图 56）；而目前采用光伏幕墙最高的建筑是阿联酋阿布扎比 CMA 塔楼，76 层，385m，在塔楼屋面和朝阳墙面上安装了光伏组件，年发电量达 $30\text{万 kW}\cdot\text{h}$ （图 57）。

5 幕墙金属支承结构的防雷

超高层建筑的特殊高度使得它成为吸引雷击的“避雷针”，作为外皮的幕墙金属结构更使超高层建筑屡受雷击（图 58~60）。



图58 迪拜哈里法塔，828m，遭受雷击，3km距离的照片（2010.1.25）



芝加哥西尔斯大厦，441m 多伦多电视塔，550m（2011.5.）



迪拜帆船酒店，340m

图59 国外高建筑遭受雷击



广州塔，600m（2011.5.7）



广州国际金融中心，435m



深圳京基大厦，445m（2011.5）

图60 我国内地高楼遭受雷击

建筑幕墙的面板里面是由铝合金型材或钢型材组成的支承结构系统。为了保证强大的雷电电流能顺畅导入地下，首先支承结构的各构件都必须电气连通，形成建筑表面的防雷网。然后幕墙这一防雷系统必须与主体结构的防雷系统可靠连接，通过主体结构的防雷导线将雷电引入地下。

这一“自成系统，可靠连接，借路行雷”的设计思想是完全可行的。由金属梁柱构成的防雷网，就像“金钟罩”一样保护了建筑本身。至今所有遭受雷击的超高层建筑，幕墙都未受到损坏。

6 小结

经过 30 年的高速发展，我国已经成为世界上幕墙产量最大的幕墙大国。目前正努力提高技术水平，加强自主创新能力，推广新技术应用，力争由幕墙大国发展成为幕墙强国。总结已有的经验，上升到规范的内容，将对今后我国幕墙技术的发展起到推动作用。AT