



中国幕墙三十年

撰文 赵西安 中国建筑科学研究院

今年是我国幕墙行业 30 周年，本文从工程和技术角度回顾我国幕墙技术发展 30 年的光辉历程，叙述我国在高层建筑和大型公共建筑中幕墙的应用、新型幕墙的发展、新材料和新做法、幕墙科研工作和技术水平的提高等方面的情况。

1 辉煌的三十年

1.1 诞生和成长的第一个10年（1981~1991）

幕墙最初出现在美国，1931 年就建成的 381m 高的摩天大楼——纽约帝国大厦采用了石材幕墙。1951 年纽约利华大厦首次向人们展示了一座全新的玻璃方盒子，这座由玻璃和金属组成的玻璃幕墙建筑宣告了现代主义建筑时代的开始。

30 年之后，作为现代主义建筑代表元素的玻璃幕墙终于出现在东方地平线上。1981 年，广州广交会展馆的正面出现了一片令人惊奇的玻璃外墙，当时人们还不知道“幕墙”这个称呼，但它已经具有玻璃面板和金属支承框架这两大特征，也许可以作为中国幕墙时代开始的标志（图 1）。

真正具有代表性的幕墙工程是 1984 年建成的北京长城饭店，这座银光闪闪的划时代建筑让看惯了无光泽实墙面建筑的人们眼前一亮，知道了什么是现代主义的建筑（图 2）。不过由于是第一步，这座单元式中空玻璃明框幕墙的板块是在比利时制作的，国内负责安装。通过这个工程的实践，我们第一次接触到了幕墙的设计施工技术。幕墙一旦出现，就迅速在国内各大工程中得到应用，其发展之迅猛超出了人们的想象。1988~1991 年间，采用玻璃和铝板幕墙的高层建筑如同雨后春笋在各地出现（图 3~8）。其中，深圳国际贸易中心是国内第一个超过 50 层、高度超过 160m 的工程，首次采用了茶色玻璃和铝板。

北京国贸中心则全部为茶色中空玻璃明框幕墙。1988 年建成的深圳发展中心是国内第一个隐框玻璃幕墙。

1.2 波澜壮阔的第二个10年（1991~2001）

上世纪 90 年代，我国全面改革开放，城市建设迅猛发展，办公楼、酒店、大型公共建筑的大量兴建给幕墙行业带来了空前



图1 广交会展馆——第一片玻璃幕墙



图2 北京长城饭店——第一座玻璃幕墙建筑



图3 深圳国际贸易中心，1985



图4 深圳发展中心，1988



图5 北京国贸中心，1988



图6 广东国际大厦，
208m，1990



图7 北京京广大厦，
210m，1990



图8 上海国贸中心，139m，1991



图9 广州市长大厦，金色反射玻璃



图10 深圳地王大厦，325m，1995



图11 广州中信大厦，322m，1996



图12 康佳展览馆钢桁架点支玻璃幕墙



图13 南宁国际会展中心，采用了大面积明框幕墙和张拉膜采光顶



图14 北京天文馆，大量双弯中空夹胶点支承玻璃

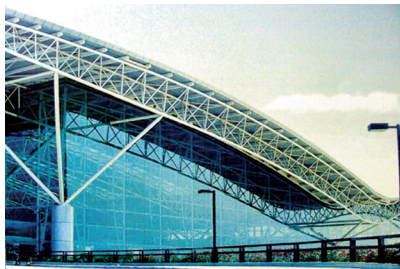


图15 深圳机场航站楼，六点支承钢化玻璃



图16 深圳新时代广场，花岗岩幕墙175m



图17 东方明珠，430m



图18 金茂大厦，420m

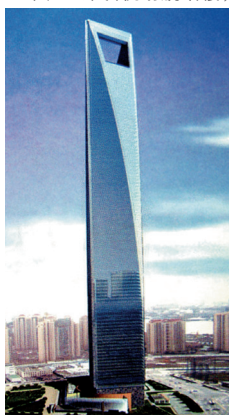


图19 上海环球金融中心，495m



图20 南京紫峰大厦，450m



图21 大连国际贸易中心，420m

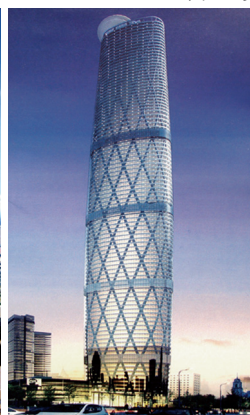


图22 广州国际金融中心，432m



图23 深圳京基大厦，441m

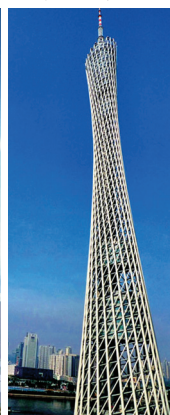


图24 广州塔，600m

广阔的机遇。

新的玻璃面料使幕墙更加多姿多彩（图9），玻璃幕墙在1995年突破了300m的高度（图10，11）。

1995年，第一个点支幕墙工程——深圳康佳展览馆建成，为许多大型公共建筑的玻璃幕墙应用打开了技术之门（图12~15）。

1997年，深圳新时代广场建成，石材幕墙达到了175m的空前高度（图16）。而上海的东方明珠电视塔则将双曲铝板和玻璃板幕墙应用于超高特种构筑物（图17）。1998年上海金茂

大厦将玻璃幕墙的高度提升至420m（图18）。

1.3 技术水平迅速提高的第三个10年（2001~2011）

第三个10年，我国幕墙年生产量已超过5000万 m^2 ，并且逐年增长的势头正旺，占世界幕墙年产量的80%以上，我国也成为世界幕墙生产大国。

在这10年中，我们把建筑幕墙应用到一批高度400m以上的超高层建筑中（图19~24），目前，一批更高的建筑正在施工中，这些建筑均采用玻璃幕墙（图25~27）。



这10年中,我们还建成或在建大批大型公共建筑,其金属屋面面积往往超过10万 m^2 ,玻璃幕墙和采光顶的面积往往超过8万 m^2 ,规模之宏大,技术难度之高,在世界上也是少有的(图31~41)。

这10年,我国的幕墙走出了国门,迈向了世界。中国幕墙公司从加工出口、分包安装到承包幕墙工程,到现在境外工程年总合同额超过百亿元。我们不仅完成了国外许多高层建筑和公共建筑的幕墙工程(图42~44),而且像迪拜哈里法塔这样高度达828m,幕墙工程量达8亿人民币的世界第一高玻璃幕墙也是由中国公司完成的(图45)。

更重要的是,在第二个10年大量工程实践经验积累的基础

上,第三个10年我国幕墙技术水平有了质的飞跃,不仅保持幕墙大国的地位,更向幕墙强国迈进。

近10年幕墙技术水平提高主要表现在:1)幕墙做法新颖特别:许多工程采用不规则分块幕墙、非光滑表面幕墙、大曲率双弯板材、特殊外饰和遮阳板、复杂表面形状和新奇构思的幕墙等;2)新型材料如特种玻璃、不锈钢和钛铜锌等非铝金属板、砂岩洞石等非花岗岩石板、陶板、PVC板和ETFE膜材已在工程中大量应用;3)柔性和刚柔结合的支承结构系统应用:张拉索杆结构支承和索网支承幕墙广泛采用;4)双层通风幕墙;5)光伏幕墙和光伏——视频幕墙;6)幕墙的研究工作广泛开展;7)



图25 广州东塔, 540m



图26 深圳平安金融中心, 648m



图27 天津117, 600m

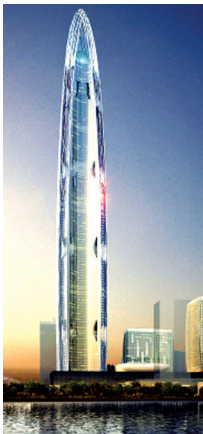


图28 武汉国际金融中心, 636m



图29 北京第一座528m建筑—中国尊



图30 目前国内最高建筑—上海中心, 632m



图31 上海世博会中国馆, 中国红条纹铝蜂窝板

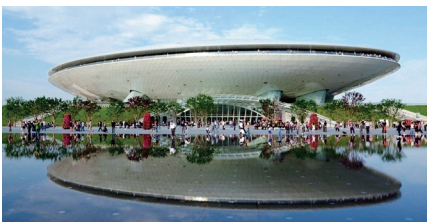


图32 上海世博会文艺中心, 银色双曲蜂窝铝板



图33 上海世博会阳光谷, 直径100m的夹胶玻璃喇叭

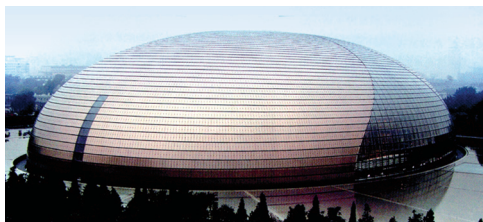


图34 国家大剧院, 4万 m^2 的椭圆形钛板和玻璃屋面



图35 水立方, ETFE 薄膜气枕式幕墙



图36 北京奥运会主运动场——鸟巢, ETFE和PVC薄膜屋面

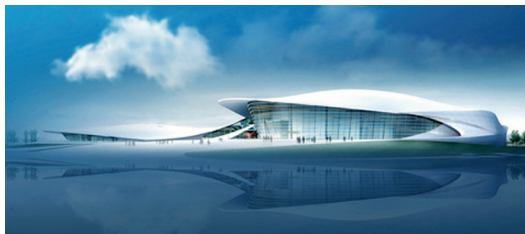


图37 广州亚运会综合体育中心, 自由曲面如飘带飞扬



图38 深圳湾体育中心, 2011年世界大运会主场馆之一



图39 首都机场T3航站楼, 屋面30万 m^2

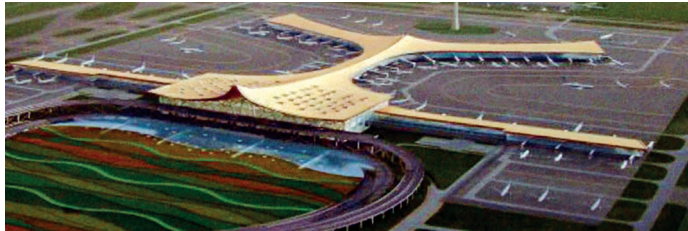


图40 昆明机场, 20万 m^2 金属屋面, 2万 m^2 索网玻璃幕墙



图41 上海浦东机场第二航站楼



图42 阿联酋迪拜商业湾幕墙工程, 14栋



图43 法兰克福机场的铁路车站幕墙工程



图44 莫斯科联邦大厦, 幕墙高340m



图45 迪拜哈里法塔, 高度828m, 建筑幕墙13万m²

高精尖幕墙的设计与施工, 超高和超大规模幕墙建造技术的提高;
8) 承接海外工程的能力大大增强。

下面介绍这 30 年来, 特别是第三个 10 年中我国幕墙技术的进步。

2 幕墙的新表现形式

2.1 非常规划分板块的幕墙

大多数幕墙采用四边形板块, 近年来幕墙形状日趋复杂, 采用三角形板块更能适应复杂的曲面(图 46~48)。图 49~52

为采用各种不同类型板块的一些工程。

2.2 非光滑表面的幕墙

幕墙的板块是立体的盒子或者簸箕, 形成凹凸进出的立体墙面, 得到特殊的艺术效果(图 53~57)。当幕墙为复杂的双曲面时, 采用立体板块单元能方便调节, 容易拟合预定的曲面。北京凤凰传媒中心为轮胎形墙面, 由簸箕形玻璃板块拼合而成(图 58)。图 59 是杭州某会所的圆盘玻璃板点支幕墙, 采用蓝色夹胶玻璃。还有许多幕墙采用了更为时尚的新颖作法(图 60, 61)。



图46 广州塔双曲抛物面塔身第108层



图47 上海航务局办公楼



图48 成都博物馆墙面三角形划分



图49 上海钢铁交易大厦蜂窝形划分

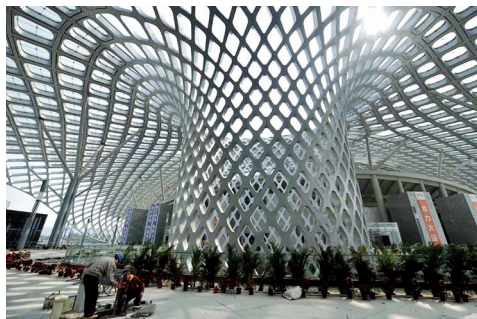


图50 深圳湾体育中心变异菱形划分



图51 深圳华侨城美术馆六边形分格

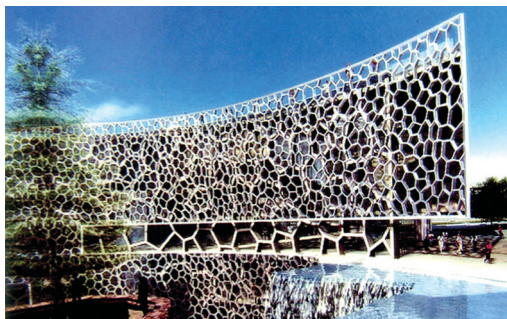


图52 上海自然博物馆细胞组织形玻璃幕墙



图53 深圳新世界中心点支玻璃盒子, 钢爪有7个支承头

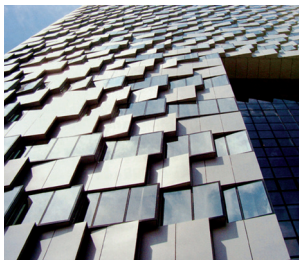


图54 北京第一商城, 铝板和玻璃的立体盒子



图55 广东图书馆凹凸花岗岩幕墙(左)和幕墙的细部(右)



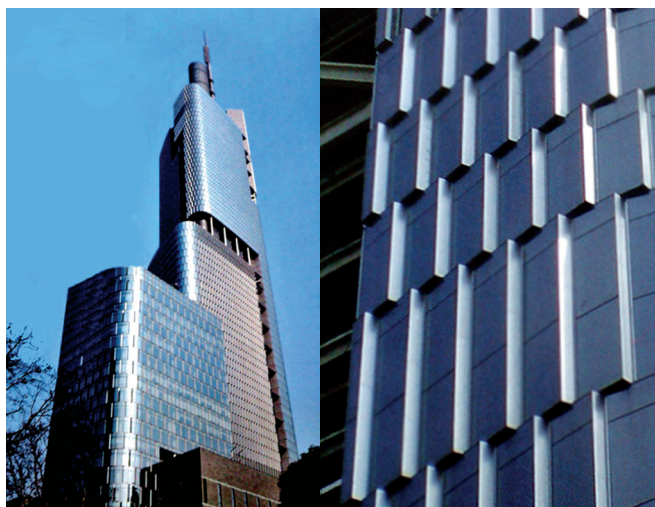


图56 南京紫峰大厦, 450m (左), 立体玻璃簾箕组成阶梯形墙面 (右)

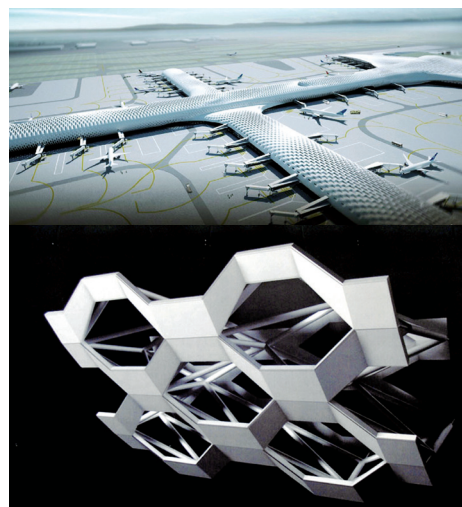


图57 深圳机场三号航站楼25万m² (上) 采用菠萝皮形的立体铝板, 空档是玻璃板 (下)

2.3 形式多样的新颖遮阳装置

新型遮阳板也是组成幕墙新颖手法的一部分, 图 62~65 是几个典型的实例。

3 新型材料的应用

3.1 各种新型玻璃

(1) 超大尺寸玻璃

目前国外生产的热弯钢化夹胶玻璃的最大长度为 6m。2010 年我国已经生产了 12.6m × 2.6m 的热弯钢化三夹胶超大规模的玻

璃, 用于上海苹果专卖店, 每块超大玻璃的售价达 100 万元人民币 (图 66)。2011 年已经生产 15.0m × 3.6m 的三块 12mm 夹胶玻璃 (图 67, 68)。长度达 18m 的产品已供货香港苹果。

(2) 离子性和反射型中间膜新型夹胶玻璃

现在大多数幕墙的夹胶玻璃采用 PVB 中间膜, 这种中间膜剪切模量 G 较低, 而且随温度升高急剧降低, 所以在进行夹胶玻璃承载力设计时不考虑其整体作用, 按两片单片玻璃计算。而离子性中间膜 (商品名称 SGP) 剪切模量 G 比 PVB 高得多,

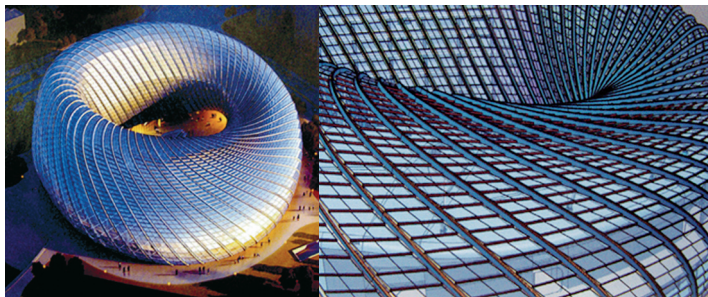


图58 北京凤凰传媒中心轮胎形玻璃幕墙 (左) 和簾箕形玻璃板块布置 (右)

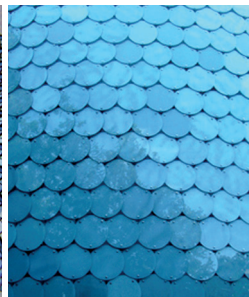


图59 杭州某会所夹胶玻璃圆盘点支幕墙



图60 青岛某银行波浪形幕墙



图61 天津中钢大厦立体蜂窝形外墙

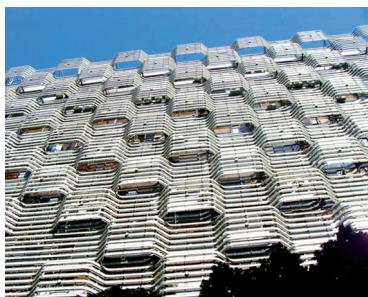


图62 深圳波浪形不锈钢管遮阳装置



图63 北京百度总部大波浪遮阳



图64 成都西部金融, 10mm铝板冲孔



图65 苏州文化中心, 3层不同图案铝板叠加

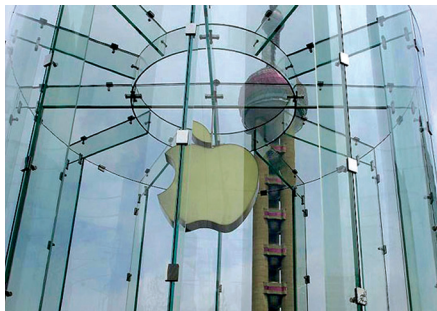


图66 上海苹果店, 圆形玻璃墙, 12片 12.6m × 2.6m 超大热弯三夹胶



图67 13.8m × 2.85m 超大夹胶热弯钢化玻璃, 厚度12mm, 三片



图68 15.0m × 3.65m × 19mm 超大超白玻璃原片

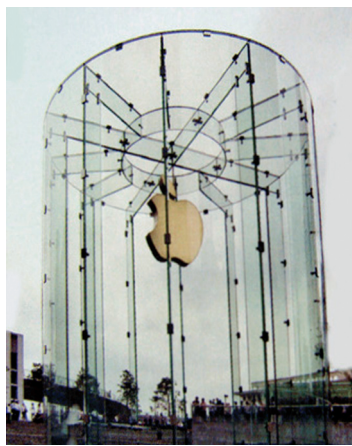


图69 上海苹果店（左）和SGP 五夹胶玻璃（右）

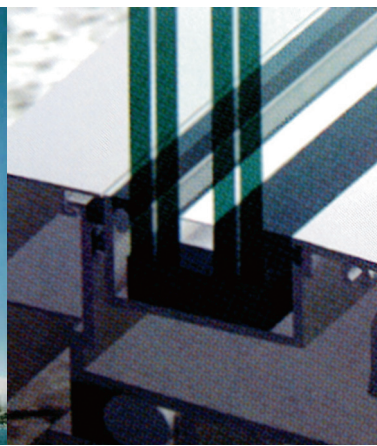


图70 广州塔（左）和SGP 双夹胶中空玻璃（右）



图71 深圳证交所采光顶XIR夹胶玻璃

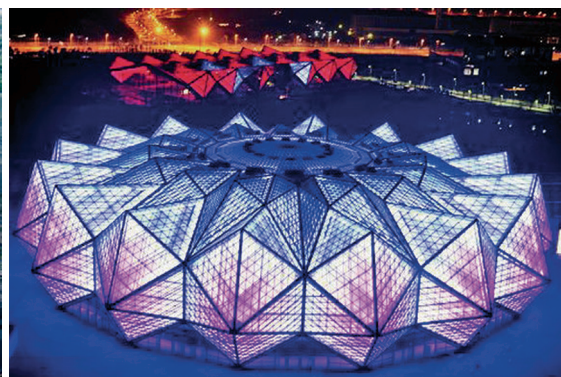


图72 深圳大运会体育馆XIR 夹胶玻璃幕墙



图73 北京天恒大厦真空玻璃幕墙



图74 电视文化中心钛锌板幕墙



图75 北京新保利大厦红铜板幕墙



图76 北京首都博物馆仿古青铜板幕墙

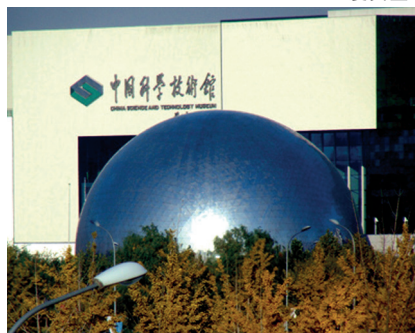


图77 中国科技馆不锈钢圆球



图78 国家大剧院钛复合板幕墙

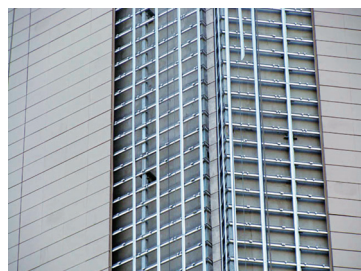


图79 中国建筑科学研究院办公楼陶板幕墙（施工时照片）



图80 北京饭店新楼采用陶板幕墙



图81 清华大学校史馆陶板幕墙钻石形墙面（左）和水平线墙面（右）

对温度敏感度较低，可以考虑夹胶玻璃的部分整体作用，因而可以提高夹胶玻璃的承载力，满足大风力下大尺寸玻璃的受力要求。上海苹果店玻璃的尺寸达 12.6m；广州塔玻璃幕墙高度达 460m，它们的夹胶玻璃都采用了 SGP 中间膜（图 69，70）。

我国海南、广东南部 and 广西南部等夏热冬暖地区，冬季不取暖而无保温要求；夏季以防太阳辐射为主。采用反射型中间膜（商品名称 XIR）的夹胶玻璃即可满足节能要求，无须做成夹胶中空玻璃。单夹胶与夹胶中空相比可节省玻璃 30%~50%，而且自重减轻后使支承结构用材相应也减少，从而达到节能和减排的目的。

深圳证券交易中心的采光顶和大运会体育馆的玻璃幕墙都用 XIR 单夹胶玻璃代替了原设计的夹胶中空玻璃（图 71，72）。

（3）真空玻璃

与中空玻璃不同，真空玻璃中间层只有 2mm 厚，抽成真空，其保温隔热性能可以满足要求。北京天恒大厦采用了 8 000m² 的真空玻璃，这也是目前世界上最大的真空玻璃幕墙工程（图 73）。

3.2 各种金属板

金属幕墙常规采用铝板。现在，根据建筑设计各种要求，不锈钢板、铜板、钛板和钛锌板已在多个大型工程中采用（图 74~78）。



图82 最高的花岗岩幕墙——广州广晟大厦，280m



图83 最高的石灰岩幕墙——青岛财富大厦，240m

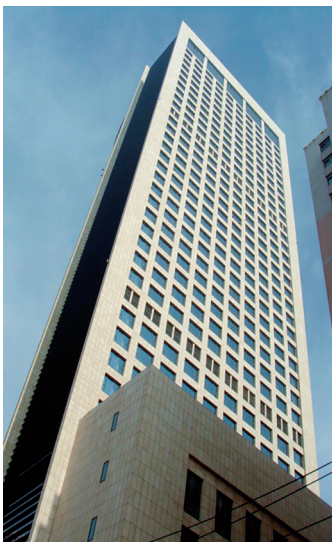


图84 最高的洞石幕墙——天津地铁大厦，175m



图85 最高的砂岩幕墙——广东发展中心，150m



图86 最大面积的红砂岩公共建筑——广州白云国际会议中心，红砂幕墙及屋面 6万m²

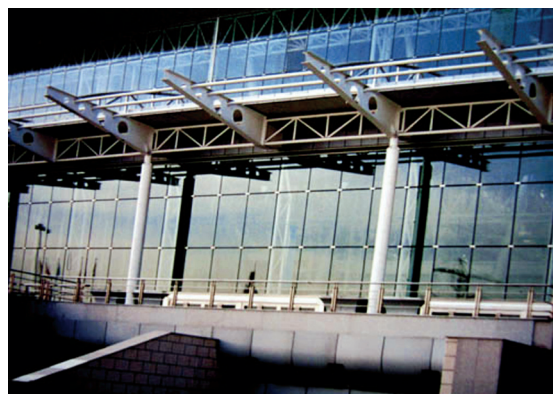


图87 哈尔滨会展中心，竖向单索

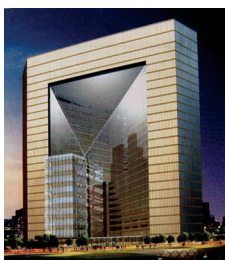


图88 北京新保利大厦，三棱面索网



图89 90m×70m超大索网内观



图90 上海中国航海博物馆，船帆高78m（左），马鞍形索网高54m（右）

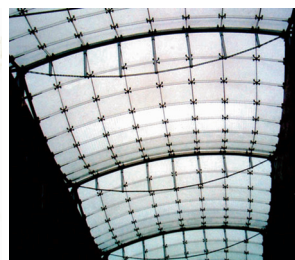
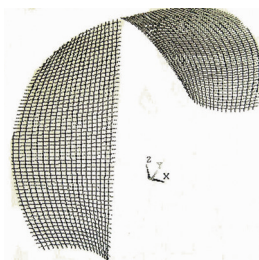


图91 马鞍形索网采光顶屋面

3.3 陶板

陶板风格古朴，防火、耐久和容易维护。尺寸通常宽150~300mm，长450~900mm，厚15~30mm，开有纵向通孔，通过背槽、挂件连接到横梁。板边有企口，开缝不打胶（图79）。目前已经在许多工程中应用（图80，81）。

3.4 非花岗岩石板

花岗岩石板幕墙已广泛应用，目前最高的花岗岩幕墙为广州广晟大厦，建筑高度330m，石材幕墙高280m（图82）。

近年来，砂岩、大理石、洞石等强度较低的非花岗岩石材普遍应用于公共建筑和高层建筑的幕墙。

非花岗岩石材要求表面防水处理，背面加贴玻璃布，并宜采用背部连接（图83~86）。

4 新的幕墙系统

4.1 索网点支玻璃幕墙

索网结构通常是双向布置张拉钢索。当跨度不超过15m时，幕墙也可以沿竖向单向布索，采光顶可以沿短向布索。索网是技术含量较高的结构系统，其设计涉及大挠度下的非线性结构分析，而且要考虑温度和初拉力的影响；其施工则要考虑预拉力的合理张拉分级和顺序，复杂程度较高。国内最早的拉索幕墙是哈尔滨国际会展中心（图87）。目前最大的单张索网是北京新保利大厦，90m×70m，三棱面（图88，89）。上海中国航海博物馆采用了两张54m高的马鞍形索网（图90），张拉在高度为78m的钢骨混凝土“船帆”上。马鞍形索网还用于采光顶屋面（图91）。

最近，超大规模的索网在大型公共建筑中广泛使用，其规模和技术难度在世界上都是前所未有的。图92为鄂尔多斯赛马场的超大



单向索幕墙，高度达 90m。昆明新机场索网幕墙面积达 2 万 m^2 ，更困难的是钢索都必须从弯曲的钢“飘带”的中间穿过（图 93）。京深港高铁深圳北站的索网幕墙总面积也超过了 2 万 m^2 ，为此还进行了整片实际大小幕墙的施工模拟试验（图 94）。

北京是抗震 8 度设防地区，国家网管中心和土城移动电话局都在两座独立的建筑之间布置索网，地震时两座建筑的相对位移将会拉断钢索，为此开发、安装了世界首个水平索端部弹簧保险装置（图 95）。

4.2 双层通风幕墙

双层通风幕墙由外幕墙、内幕墙或门窗以及它们之间的热通道构成。用自然通风或机械通风在热通道形成稳定的气流，改善室内环境，有时还可以降低取暖和空调的能耗。我国最早的双层通风幕墙是北京会计师培训中心（图 96），此后各地陆续建造了许多工程，同时也在探索这项新技术的合理应用途径（图 97~100）。

5 光伏幕墙和光伏屋面

现在新的理念是：幕墙不仅要节能，而且要产能。这就是所谓“能量平方”的概念。光伏幕墙利用光伏电池将太阳的光能转变为电能，这是一种清洁能源，特别是日本福岛核电站发生事



图92 鄂尔多斯赛马场，90m竖索



图93 昆明机场屋盖用金色“飘带”支承，索网穿过“飘带”中间

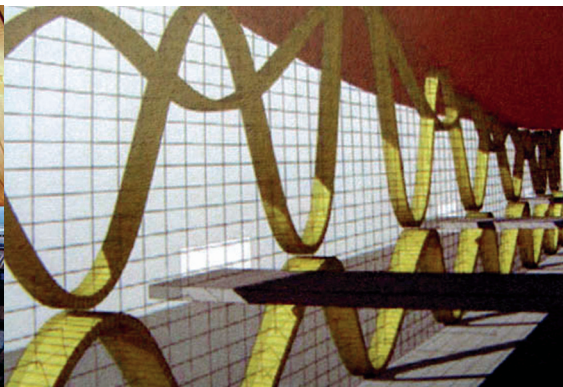


图94 深圳北站总面积超过2万 m^2 的索网幕墙



图95 防止地震时被拉断，钢索设置弹簧保险装置



图96 最初的双层幕墙——北京会计师培训中心



图97 热通道：北京旺座大厦



图98 热通道：武汉精纶办公楼



图99 深圳电视中心，透镜形点支式双层通风幕墙（左）和热通道（右）



图100 热通道：南京人寿保险公司



图101 江西新余，500kW 光伏屋面



图102 上海世博会中国馆，3 000 m^2 光伏屋面



图103 世博会主题馆，3万 m^2 光伏板

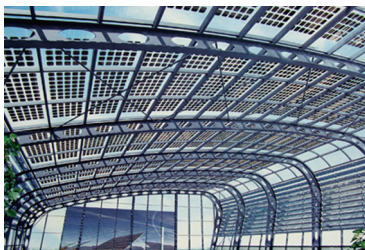


图104 汕头金刚公司关伏屋顶



图105 薄膜电池光伏幕墙办公楼



图106 浙江建研院薄膜电池墙面



图107 保定电谷酒店, 窗口光伏元件



图108 绵阳(9度地震区)幕墙完好



图109 都江堰(9度地震区)玻璃幕墙完好无损



图110 青城山(9度地震区)幕墙完好无损



图111 玉树机场玻璃幕墙震后完好无损, 保证了救灾



图112 玉树隐框幕墙完整

故后,我国发展光伏能源的势头更猛。

6 幕墙技术的研究工作

我国在幕墙技术的研究方面做了很多工作,在幕墙设计方法方面进行了玻璃面板的设计方法、支承结构设计方法、幕墙节能和热工计算以及热通道气流状况和热工性能等的研究等。此外还进行了许多新材料的性能试验以及大型工程的性能试验和幕墙振动台试验,如中央电视台专门建造了 $18\text{m}\times 24\text{m}$ 的超大试验箱, 18m 高的幕墙菱形区域整体进行多项测试。深圳北站 $2\text{万}\text{m}^2$ 的索网幕墙专门建造了实际大小样板,进行设计校核和施工过程的研究。目前我国最大的振动台台面已经达到 $6\text{m}\times 6\text{m}$,载重 60t ,进行过很多幕墙的振动台试验,其中包括幕墙的形式实验和对特定工程项目的幕墙试验。

7 幕墙标准规范

我国在上世纪90年代初着手进行了我国建筑幕墙标准规范的编制工作。在总结我国幕墙工程经验和科学研究成果的基础

上,先后颁布施行《玻璃幕墙工程技术规范》(JGJ 102—96)和《金属与石材幕墙工程技术规范》(JGJ 133—2001),大大提高了我国幕墙工程的设计施工水平。2003年,修订后的《玻璃幕墙工程技术规范》(JGJ 102—2003)颁布施行。2012年,新版本JGJ 133和JGJ 102规范进入报批阶段,不久即将颁布。

2008年汶川大地震和2010年玉树大地震的震害调查表明:我国的幕墙规范经受了地震的考验,按照规范进行设计施工的幕墙工程达到了设防烈度下保持完好或基本完好的要求,甚至在超烈度的强震下,也还能保持完整(图108~112)。

8 小结

回顾我国幕墙技术发展三十年的历程,我们感到无比的兴奋和自豪;展望未来,我们看到广阔的前景,同时也会感到任重而道远。我们承担着将我国从产量高的幕墙大国转变为技术高的幕墙强国的历史重任,让我们为此而共同努力。AT



作者简介

赵西安, 1964年毕业于清华大学土木工程系工民建专业,1967年工程结构专业研究生毕业。现为中国建筑科学研究院研究员、教授。建设部幕墙门窗标准化委员会专家组顾问,中国建筑金属协会铝门窗幕墙委员会专家组成员,中国建筑装饰协会幕墙工程委员会专家组成员,中国建筑学会结构分会高层委员会委员。主要从事建筑结构、建筑抗震、建筑幕墙和钢结构方面的研究、技术开发和技术咨询、工程标准规范编制工作。

幕墙方面,主持和主编《玻璃幕墙工程技术规范》JGJ102和《金属与石材幕墙工程技术规范》JGJ133,参编《采光顶及金属屋面技术规范》等标准。1995~2003年间,作为甲方工程顾问监管了广州市长大厦、交通大厦、建设银行大厦、广东省公安厅;深圳市新时代广场、公路大厦;青岛光大银行;北京普天大厦等十余座大型建筑的幕墙工程。2004~2006年间,参与深圳市民中心、电视中心,广州合银大厦;北京央视大楼、北京电视中心、中国移动大厦、中国网通大厦和五棵松体育馆等幕墙工程的咨询工作。近期参与的大型工程有广州电视塔(620m)、广州西塔大厦(高435m)、天津塔大厦(高340m)、天津地铁大厦(180m)、青岛大剧院等。

出版了《玻璃幕墙设计、施工和监理》(1995)、《幕墙工程手册》(1996)、《建筑幕墙工程手册》(上、中、下,2003)等幕墙方面的专著。发表了有关幕墙方面的论文40余篇。