



钢结构设计系列丛书

玻璃幕墙结构

张其林 主编



山东科学技术出版社
www.lkj.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

玻璃幕墙结构/张其林主编. — 济南: 山东科学技术出版社, 2006. 2

(钢结构设计系列丛书)

ISBN 7—5331—3900—3

I. 玻... II. 张... III. 玻璃幕墙-结构设计
IV. TU227

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 020250 号

钢结构设计系列丛书

玻璃幕墙结构

张其林 主编

出版者: 山东科学技术出版社

地址: 济南市玉函路 16 号

邮编: 250002 电话: (0531)82098088

网址: www.lkj.com.cn

电子邮件: sdkj@sdpress.com.cn

发行者: 山东科学技术出版社

地址: 济南市玉函路 16 号

邮编: 250002 电话: (0531)82098071

印刷者: 山东新华印刷厂潍坊厂

地址: 潍坊厂潍州路 753 号

邮编: 261041 电话: (0536)2116928

开本: 787mm×1092mm 1/16

印张: 18.5

字数: 410 千

版次: 2006 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

印数: 1—3000

ISBN 7—5331—3900—3

TU · 192

定价: 32.00 元

前 言

数千年前人类就发明了玻璃。玻璃是最古老的但还在对现代生活产生深刻影响的人造建筑材料。玻璃最基本的特征是通透性和耐久性,因此是建筑物最理想的围护材料,而现代建筑的明快性和简洁性正是由于玻璃而得到了最大限度的实现。近年来,玻璃作为板、梁、柱等支承单元和结构的功能已被人们所认识,并日益广泛地在工程中得以实践。玻璃事实上已成为仅次于混凝土和钢材的最重要的建筑材料。现代建筑需要大量的大尺寸和新功能的玻璃材料,这给玻璃工业带来了广泛的机遇,而给结构工程师带来的是巨大的挑战。当结构工程师使用玻璃作为结构单元的时候,必须时刻提醒自己:玻璃是一种脆性材料,它会带来比传统材料远为复杂的设计问题。正是因为玻璃材料既古老又现代,既迷人又复杂,玻璃结构才在世界范围内成为结构工程领域的研究热点之一。

我国自改革开放以来,玻璃结构主要是玻璃幕墙结构的应用得到了非常迅速的发展。应该承认:我国玻璃结构的应用和研究滞后国外先进国家数十年。关注玻璃结构应用研究的是企业单位而非研究单位;关注玻璃结构设计研究的是建筑师而非结构工程师。虽然近年来玻璃结构的研究已逐渐得到了国内许多科研单位和高校的重视,与玻璃结构相关的规范规程正在完善,但这一领域的研究仍然明显滞后于工程应用。迄今为止,绝大多数高校中仍然没有开设玻璃或玻璃幕墙结构的课程,绝大部分结构工程师仍然不熟悉玻璃材料的特征。有鉴于此,作者编写此书希望有助于在高校和设计单位中普及玻璃材料及其结构知识,有助于相关技术人员了解玻璃结构的应用和研究情况,有助于推动这一领域的研究工作。

本书详细地罗列了玻璃及其结构体系的类型和特点,全面地介绍了玻璃单元的计算模型、分析理论和设计方法,较完整地提供了框支式和点支式玻璃幕墙的设计实例;简略回顾了历史发展,详尽阐述了规范方法,重点介绍了最新成果。同济大学殷永炜博士、赵佳男硕士、罗晓群博士、吴芸博士、金鑫博士、王洪军博士和史继勇硕士参与撰写了本书的部分章节,并进行了部分实例的设计和计算;汕头金刚玻璃幕墙公司黄庆文先生和上海远大玻璃幕墙公司孟根宝力高先生撰写和审核了本书部分章节及工程实例部分。全书由同济大学张其林教授负责撰写并定稿。本书可作为科研单位、高校、建筑设计单位和玻璃幕墙企业相关技术人员的参考用书,也可作为大专院校研究生和本科学生的教科书。限于所及资料有限,书中难免有错误和不妥之处,敬请专家批评指正。

编 者

目 录

第一章 玻璃结构的发展和应用	(1)
第一节 建筑形式.....	(2)
第二节 发展历程.....	(4)
第三节 我国玻璃结构的应用现状	(11)
第四节 研究现状	(15)
第二章 玻璃幕墙的物理性能	(18)
第一节 基本概念	(18)
第二节 热工性能	(22)
第三节 采光性能	(40)
第四节 隔声性能	(61)
第五节 气密性能	(63)
第六节 水密性能	(65)
第七节 抗风压性能	(66)
第八节 幕墙的平面内变形性能	(66)
第三章 玻璃的类型和要求	(68)
第一节 玻璃板材的制作	(68)
第二节 化学成分和抗腐蚀性	(69)
第三节 微观结构和断裂特性	(70)
第四节 表面结构	(71)
第五节 强度	(71)
第六节 玻璃的材料参数和应力—应变曲线	(72)
第七节 结构玻璃的类型	(73)
第八节 建筑玻璃的类型	(76)
第九节 玻璃的性能和质量要求	(81)
第四章 玻璃结构的单元和体系	(90)
第一节 玻璃结构单元	(90)
第二节 玻璃结构构成方式	(96)
第三节 玻璃结构中子结构形式	(97)
第五章 玻璃结构的节点	(105)
第一节 构造原则.....	(105)
第二节 镶框连接.....	(105)
第三节 压条连接.....	(107)

第四节	隐框幕墙的结构胶连接	(109)
第五节	夹板连接	(112)
第六节	玻璃不钻孔的点支式连接	(113)
第七节	玻璃钻孔的点支式连接	(114)
第八节	无框玻璃之间的连接	(115)
第九节	悬挂玻璃连接	(117)
第十节	幕墙的楼顶连接	(118)
第十一节	幕墙的楼层连接	(119)
第十二节	幕墙与地面的连接	(121)
第六章	玻璃结构中的金属材料	(122)
第一节	建筑钢材	(122)
第二节	不锈钢	(123)
第三节	铝合金材料	(128)
第七章	结构胶和密封胶	(132)
第一节	工作原理	(132)
第二节	物理力学性能	(133)
第三节	主要型号及强度设计值	(135)
第八章	荷载及效应组合	(136)
第一节	荷载和作用取值	(136)
第二节	荷载效应组合	(153)
第九章	玻璃面板的设计方法和计算模型	(155)
第一节	计算理论	(155)
第二节	设计方法	(155)
第三节	极限状态设计法	(156)
第四节	单片玻璃	(157)
第五节	中空玻璃	(167)
第六节	夹层玻璃	(178)
第十章	框式幕墙支承体系的计算和设计	(193)
第一节	基本构成和计算原理	(193)
第二节	构件设计	(196)
第三节	连接设计	(201)
第四节	框式幕墙计算实例	(206)
第十一章	点支式幕墙支承体系的计算和设计	(219)
第一节	基本构成和计算原理	(219)
第二节	刚性支承体系	(221)
第三节	柔性支承体系	(225)
第四节	半刚性支承体系	(238)

第五节 点支式玻璃幕墙计算实例.....	(240)
第十二章 玻璃幕墙的 CAD 软件应用	(251)
第一节 概述.....	(251)
第二节 框式玻璃幕墙的 CAD 软件应用	(251)
第三节 点支式玻璃幕墙的 CAD 软件应用	(268)
参考文献.....	(280)

第一章 玻璃结构的发展和应用

很久以来,建筑工程中的玻璃一般是作为透明或半透明的部件,根据气候、声学或其他要求对建筑物的空间进行分隔和围护。玻璃在两个空间之间起过滤功能,容许、阻滞或反射一定的物理流。建筑物外表面的玻璃起防止潮湿、减少热流和声波的功能,但是容许可视光线的通过。起建筑功能的玻璃有很长的应用历史,从古老的教堂^[1](图 1-1)到温室的玻璃(图 1-2),这种材料的装饰性和通透性极大地提高了建筑物的魅力。

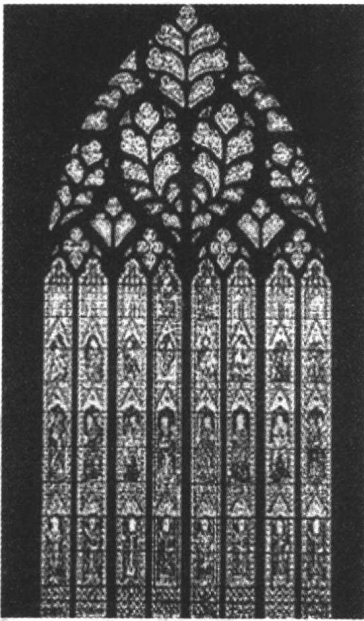


图 1-1 教堂玻璃窗



图 1-2 温室屋顶

人们一直武断地认为:玻璃太脆,不足以起承受荷载的作用,因而一直忽视了玻璃的工程材料功能。直到最近,玻璃的结构功能才得到人们广泛的认可和应用。这是因为,一方面,玻璃加工技术的发展使得玻璃的机械强度得以大幅提高;另一方面,现代建筑的发展要求在越来越广的范围内使用越来越多的玻璃。

1929 年法国公司 Saint-Gobain 通过施加预应力实现了钢化玻璃生产的可能性,1909 年 Edouard Benedictus 取得了夹层玻璃生产的专利,这些创造了现代玻璃结构得以发展的基本条件。这两类玻璃最初都是为交通工具而发展的。1955 年 Alastair Pilkington 发明的玻璃的浮法制作工艺是玻璃结构发展的一大步,这一工艺使得大面积的高质量的玻璃生产成为可能^[2]。

近几十年来,人们开始深入地研究作为承载材料的玻璃性能,以及作为结构单元甚至结构体系的玻璃面板工作性能。可以认为,世界现代建筑在新技术、新结构、新材料等方面运用的最突出的成就是玻璃在建筑工程中的应用和推广。在现代建筑中,建筑师和结

构工程师将玻璃的透明特性和结构功能发挥得淋漓尽致,玻璃的应用已成为现代建筑技术不可分割的部分。可以毫不夸张地说,没有玻璃,人们将生活在半黑暗的、毫无生机的建筑中。

第一节 建筑形式

玻璃结构的形式和应用是十分广泛的,它几乎深入到建筑的每一个角落。玻璃结构从建筑形式上,可以分为下列几大类^[3]:

- (1) 玻璃幕墙;
- (2) 玻璃屋顶;
- (3) 防坠落玻璃;
- (4) 可行走玻璃;
- (5) 玻璃支承构件(梁、柱)。

一、玻璃幕墙

玻璃幕墙是垂直布置的以承受水平风荷载为主的外围护或装饰性玻璃结构,它由支承结构体系与玻璃面板组成、相对主体结构有一定位移能力、将荷载传递给主体结构但不承担主体结构所受的作用。玻璃幕墙经历了最初的明框构件式幕墙(图 1-3),后来的隐框幕墙(图 1-4)和现在的点支式幕墙(图 1-5)的发展历程。

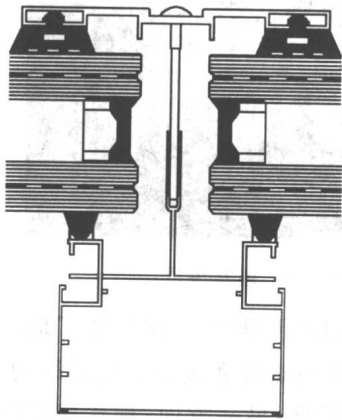


图 1-3 明框幕墙

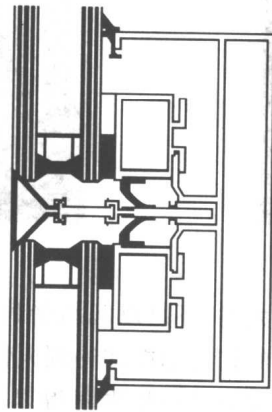


图 1-4 隐框幕墙

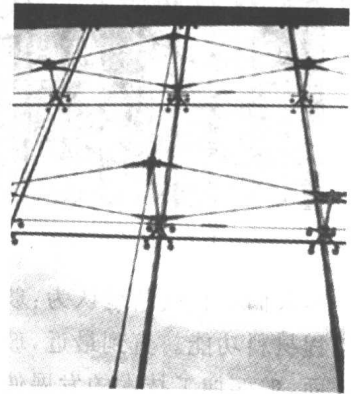


图 1-5 点支式幕墙

二、玻璃屋顶

与玻璃幕墙相比,玻璃屋顶是水平布置的承受竖向荷载和风荷载的玻璃结构,其与垂直面的夹角一般大于 10° 。玻璃屋顶的玻璃主要承受自重和雪载作用,一旦破坏而发生坠落会直接危害人员安全,因而有较高的剩余强度要求。剩余强度是指玻璃在发生破坏后不从支承体系脱落的时间,一般要求为 24 小时。普通玻璃由于钻孔处孔边强度太低,一般不允许用于点支式幕墙和玻璃屋顶。为了确保剩余强度,玻璃屋顶均采用夹层玻璃。

最典型的例子是莱比锡展览馆中央大厅(图 1-6)。整个大厅长 244m,宽 80m,高约 35m。玻璃屋顶面积为 26050m²,两端幕墙 3000m²;玻璃屋顶采用四点支承的夹层玻璃

(8mm+1.52mmPVB+8mm,1994年)。

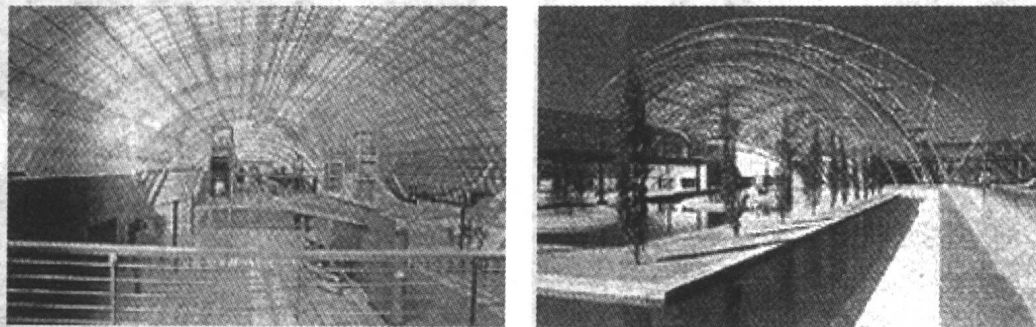


图 1-6 莱比锡展览馆中央大厅

三、防坠落玻璃

当两个地平面高度差大于等于 1m 时,为防止人员坠落而设置的玻璃隔离结构称为防坠落玻璃。通常可将防坠落玻璃分成三类:

A类:防坠落功能全部由玻璃承担。这时必须采用夹层玻璃,或受冲击一侧采用夹层或钢化玻璃的中空玻璃。计算荷载一般作用于约 1m 高处,取水平荷载为 1 kN/m 或 0.5 kN/m(取决于应用场所)。

B类:在 A 类玻璃上带有一连续的扶手,此时,玻璃和扶手同时承担荷载。玻璃一般采用夹层和钢化玻璃,扶手则采用不锈钢或不锈钢外包木质表面。

C类:这是最常见的一种,在 B 类玻璃上带有附加的栏杆。这时玻璃不再承受水平荷载(风载除外)(图 1-7)。

除静态计算之外,对防坠落玻璃结构常常进行冲击试验,以模拟人体对玻璃的冲击。

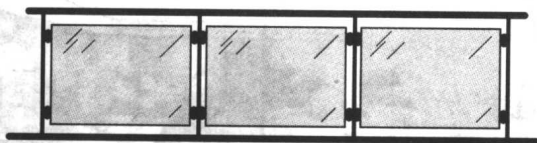


图 1-7 C 类防坠落玻璃

四、可行走玻璃

可行走玻璃指一般对公众开放,可在其上自由行走的玻璃楼板、地板和有特殊要求的屋顶,如图 1-8 所示。

可行走玻璃一般由至少三层夹层玻璃组成,表面一层一般采用钢化或半钢化玻璃,以确保较好的抗冲击性能,玻璃表面一般采用喷砂工艺或贴防滑条以防滑。在设计时,应考虑均匀活载 3.5kN/m^2 或 5kN/m^2 和单个活载 1.5kN 或 2kN。除设计外,一般也要进行硬冲击实验,实验冲击体为 40kg 的圆柱体,端部有一直径为 8mm 的螺母,冲击高度为 80cm。其要求玻璃不被击穿,并保证在 30 分钟内不从支承处滑落。

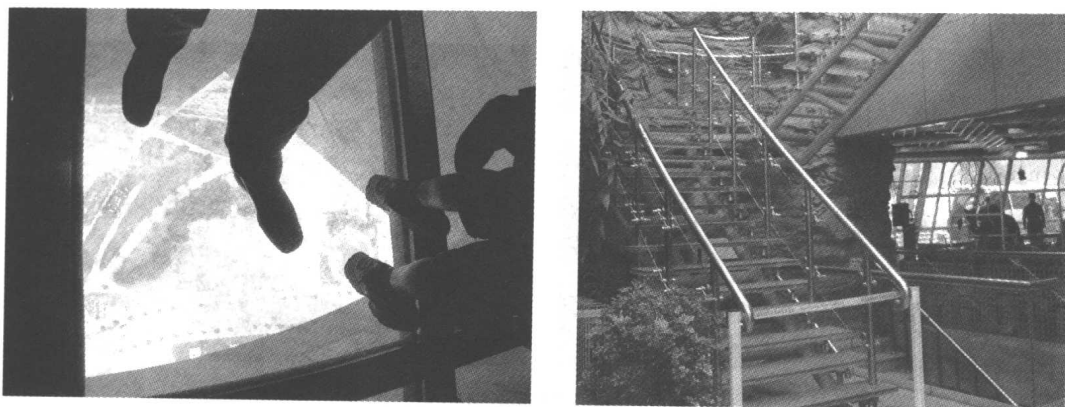


图 1-8 可行走玻璃

五、玻璃支承构件

玻璃作为支承构件(图 1-9)的应用范围十分广泛,常见的有玻璃梁、柱、受压单元等,一般采用夹层玻璃。应慎重选择玻璃和玻璃、玻璃和金属之间的连接填充材料,太软或太硬都不行,其耐久性、强度和硬度都起相当重要的作用。值得指出的是,采用玻璃作为支承构件时,必须考虑整个系统的安全性,即要求构件损伤时整个结构不发生破坏。

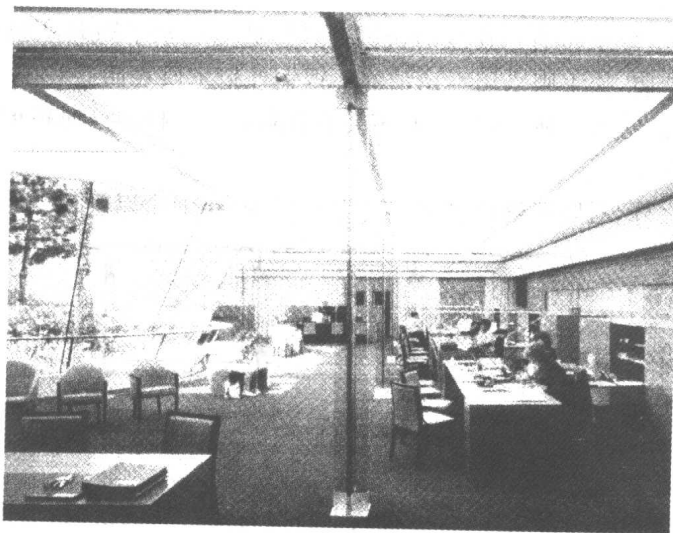


图 1-9 作为支承构件的玻璃

玻璃幕墙是应用最为广泛的玻璃结构建筑形式。

第二节 发展历程

一、框式玻璃幕墙

1851年英国伦敦工业博览会水晶宫(Crystal palace)是第一个采用玻璃幕墙的建筑,面积 90000m^2 。现代幕墙技术是上世纪中叶在美国开始发展的,当时大量的幕墙采用将玻璃和实心嵌条镶入由横竖构件组成的框架中,框架连接于主结构上,形成了所谓的明框

幕墙。当时最有影响的幕墙之一是 1952 年建造的纽约 SOM 的 Lever 建筑上的立面〔图 1-10(a)〕,承重的轧制钢截面外包不锈钢板,使用油灰来固定单片玻璃。为了阻止火的扩散,在幕墙后设置一个砖混隔断条,置于框架梁的位置或楼板下。欧洲同时期的建筑是 1955 年建造的哥本哈根的 Jespersen 办公楼〔图 1-10(b)〕,精致的金属截面框架装饰了建筑立面,框架内镶嵌绿色玻璃。但是,幕墙支承结构采用了笨重的木材,以实现怀旧的人工风格。Jespersen 办公楼采用了中空玻璃,笨重的玻璃嵌条也采用绿色以与玻璃板相匹配^[1]。

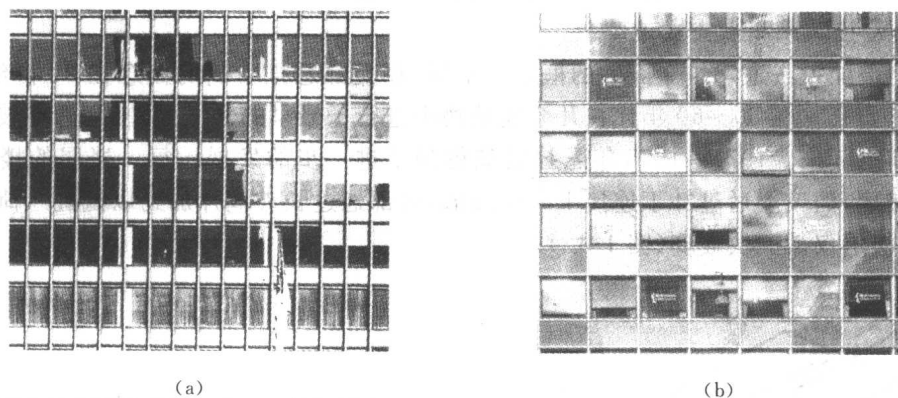


图 1-10 早期的玻璃幕墙

最早的工厂预制的幕墙是 1949~1956 年在美国密歇根底特律附近建造的通用汽车技术中心。玻璃节点采用了特殊的非常适合汽车工业建筑的合成弹性橡胶紧固条〔图 1-11(a)〕,这在汽车中应用很广。在这前后(1955~1957 年),SOM 在设计纽约的 Idlewild 国际机场到达厅时采用了这一新材料。在到达厅中采用了压配金属夹件对橡胶封条施加压力以固定玻璃。但是,这一构造并不十分有效,很快就遭弃用〔图 1-11(b)〕。合成弹性橡胶封条随后在建筑幕墙中得到了广泛应用,自 20 世纪 60 年代中期后已经成为幕墙的技术特点。在 60 年代美国市场出现了各种采用整体合成橡胶节点的玻璃幕墙系统〔图 1-11(c)〕,除了起密封作用外,还可采用这些节点将玻璃面板固定于框架上。这些系统是试图用高度工厂预制代替现场人工安装的努力的结果。Norman Foster 于 1970 年在伦敦一个两层楼的建筑中首次采用了这样的整体合成橡胶节点。这一技术促成了具有奇特建筑效果的隐框幕墙的发展。

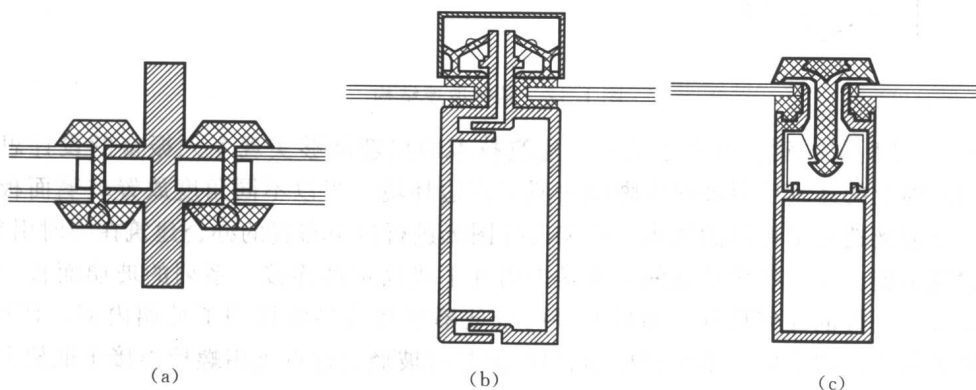


图 1-11 橡胶封条节点在玻璃结构中的应用

合成橡胶封条的出现又促使人们进一步研究可以直接将玻璃粘结于框架上的硅酮胶。这一工作开始于1960年前后的美国,1963年第一次在幕墙中得到了应用。硅酮胶不再仅仅起密封作用,还起承受玻璃自重并将风压和风吸力传递到框架的结构作用,从而成为玻璃幕墙中重要的受力连接件。这一技术迅速发展并对70~80年代美国的建筑幕墙产生了重要影响。实现完全光滑的没有任何阻碍的立面和屋面终于成为可能。为了遮挡支承结构以及楼板等,开始大量使用着色和反射玻璃。

二、悬挂玻璃和点支式玻璃

与将玻璃镶嵌进建筑立面中的框架内不同,在上部悬挂玻璃的概念在20世纪50年代得到了研究。在50~60年代在几个建筑物中进行了最早的尝试。随后,悬挂玻璃的思想迅速流行起来。1971~1975年悬挂玻璃得到了进一步的发展。每一楼层的楼板上悬挂一块玻璃,而玻璃通过补丁连接下一块玻璃,内部通过长玻璃片加劲以抵抗风荷载。这样,每一楼层仅需两块玻璃(图1-12)。

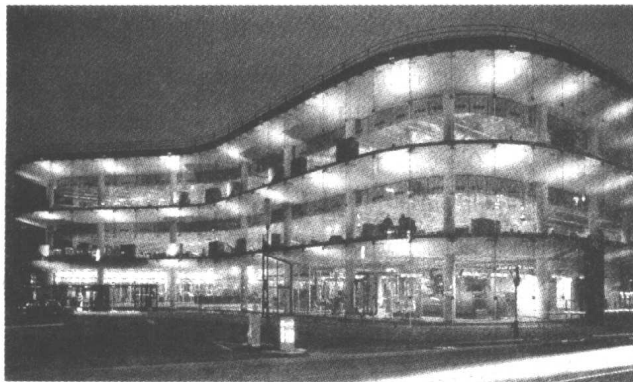
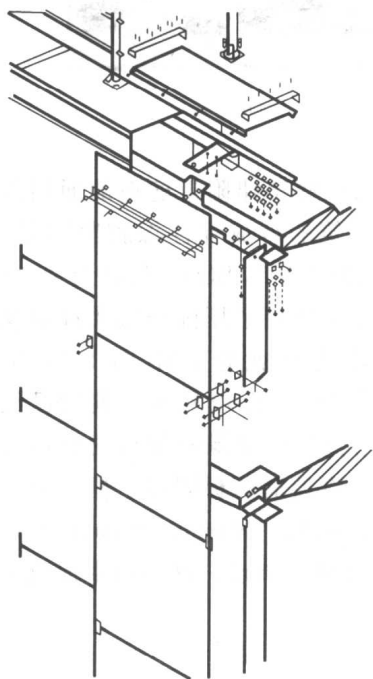


图1-12 悬挂玻璃结构

图1-12所示的建筑物充分说明了建筑技术的更新能够实现令人振奋的设计思想。建筑物立面上的连续反射玻璃清晰地映照了周边环境。当以不同角度放置玻璃面板时,不同的反射光造成了奇妙的效果。根据设计图纸进行自由布置的办公建筑在当时引领了新的建筑潮流。这一技术革新的关键是采用补丁式固定件连接一系列的玻璃面板,突破了一块玻璃面板的几何尺度。随后发展的全玻幕墙将连接转移到了玻璃内部。1982年建造的瑞典雷诺汽车中心不再将玻璃悬挂,而是将玻璃通过点支用螺栓连接于框架上(图1-13)。

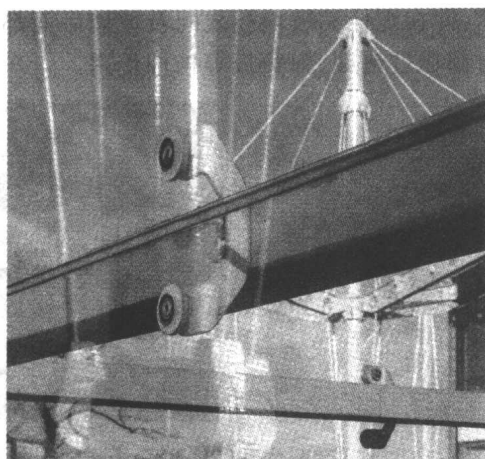


图 1-13 点支连接的玻璃结构

建筑幕墙在 1980 年以来推广应用范围日益拓宽。建筑幕墙的技术含量不断增加,新技术应用日渐增多,呈现出多样化、工厂化和现代化特点。点支式玻璃幕墙这时候开始出现。英国的玻璃厂家皮尔金顿首先开发了第一代的 DPG 连接安装法,但那时人们称之为补丁式装配体系(Patch Fitting System),见图 1-14。其基本构造做法就是在经过钢化处理后的玻璃四角打好孔,然后用方形的连接板前后夹住玻璃,并用螺栓加以固定。位于玻璃后面的连接板则与金属肋连接,从而把玻璃板吊住。这样做成的幕墙,有许多明显的补丁,极大地影响了建筑物的整体美观。

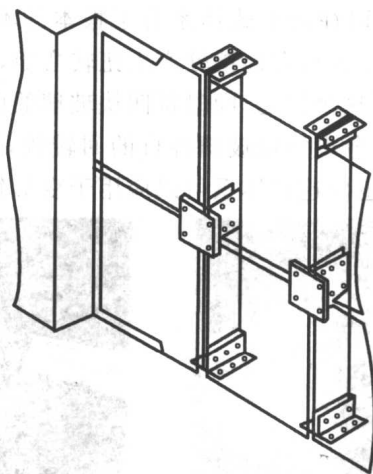


图 1-14 补丁式装配体系(Patch Fitting System)

进入 70 年代,皮尔金顿公司进一步开发了称为第二代的安装方式,当时被称为平式装配体系(Plane Fitting System),见图 1-15,它是在原有连接方式的基础上,取消了立面上看得十分清楚连接板,而代之以立面上几乎看不清楚的面积极小的四个平头螺钉,也就是在钢化玻璃的四角按照螺栓的断面形状打孔,然后用螺栓加以固定。由于玻璃和螺栓本身都是硬的材料,打孔处很容易因重力、风力、地震力等因素引起应力集中,所以应用

了厂家专利的软连接技术,即在螺栓和玻璃孔之间及玻璃后面都加上垫圈起缓冲作用,这样每块玻璃上所受的外力都通过垫圈、弹簧板等构件传递。

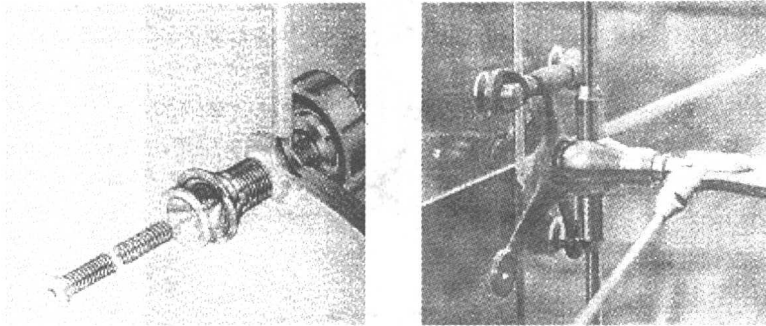


图 1-15 平式装配体系 (Plane Fitting System)

1986 年法国建筑师安德良在拉·维莱特科学馆的立面设计中,应用了点支式技术,为全世界的建筑师所瞩目,被人们称之为拉·维莱特体系(Lavillette System)^[4]。在这一幕墙中,没有承受水平荷载的楼板,工程师采用索桁架体系,通过点支承来连接玻璃并承受玻璃幕墙上的水平风荷载。这里,玻璃为索桁架提供了稳定支撑,起着结构单元的作用。玻璃通过预张紧的钢弹簧悬挂在顶部。为了减小玻璃面板的应力集中并精确计算其应力分布,采用了精确位于玻璃面板平面内的带活动关节的点支座,四点支座构成了一个 H 形的爪件(图 1-16)。该体系的主要特点就是在玻璃四角开的孔洞中安装了一个半球状的铰接螺栓,它可以自由地转动,而且这个特制的螺栓的转动中心和玻璃的重心(即厚度的中心)是一致的。这就与以往的平式体系有了根本的不同,平式体系由于玻璃的支承构件都突出于玻璃之外,这很容易在连接处产生扭转弯矩,但拉·维莱特体系则使转动中心与玻璃重心一致而避免了这个问题,同时每四块玻璃的四个孔洞用一个 H 形或 X 形的构件加以连接。在四个点上分设每块玻璃各自的回转铰,以此来控制因风力和地震力引起的每块玻璃的位移,这样也使这种体系可以应用于变形较大的结构骨架上。

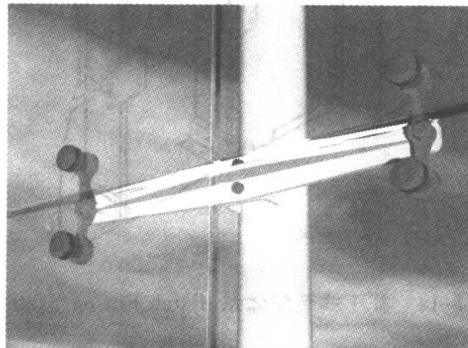


图 1-16 H 形连接

H 形的爪件很快被 X 形的四点爪件所替代。在 X 形爪件中,只在 X 的中心设置了一个活动关节。这是因为,人们认识到由硅酮胶相连的玻璃墙面的整体刚度较大,墙面中各个玻璃板片发生的相对变形相对较小。

1990年在桁架支承点支式玻璃幕墙中首次采用了中空玻璃。设计者采用了玻璃面板中面带活动关节的点支座。但是安装必须严格校准中空玻璃板的钻孔,这实际上很难做到,所以在点支座局部采用了三层厚的夹层玻璃。

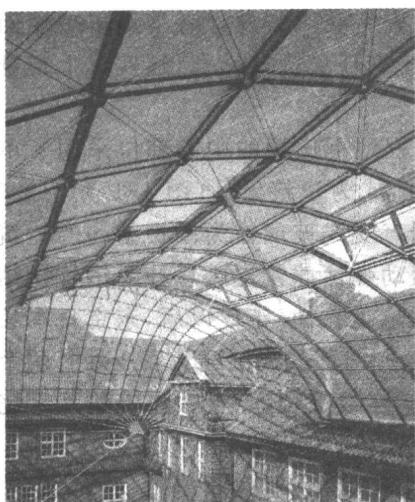
1993年世界建筑大师贝聿铭先生在卢浮宫改建工程地下广场的中心部位采用了单拉互连点支式技术,令建筑、结构、机械技术绝妙的结合,成为建筑极品(图 1-17)。1996年完工的德国莱比锡展览中心是目前世界上最大的用点支式玻璃作为围护结构的建筑物,其总面积 26050m²,采用 20mm 厚玻璃屋顶,应用活动弹性球铰支座悬挂在钢管拱结构上,玻璃屋顶的跨度为 80m。日本应用点支式连接法也是在 90 年代以后,东京日本长期信用银行就是较早的一个实例。这栋坐落在日比谷公园对面的高层建筑底座处有两个 30m 高的玻璃盒子,前面的一个透明入口大厅采用点式连接法,其点支式连接法几乎完全参照法国拉维莱特体系。



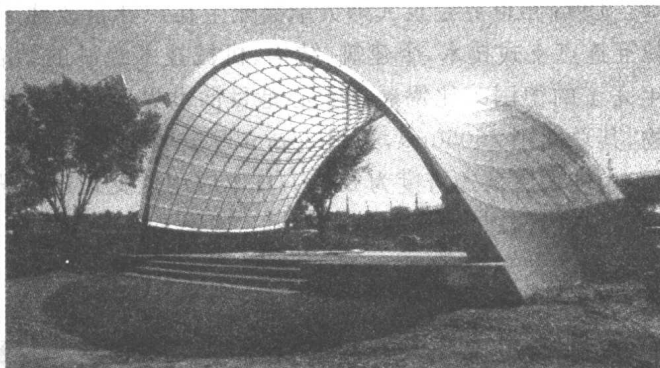
图 1-17 法国卢浮宫

四、网格结构

20世纪80年代末,德国 Schlaich 教授创作了玻璃壳屋面。结构的主网格由直杆构成的菱形网格组成。通过改变矩形网格直角处的位置可以生成任意形状的直杆菱形网格。两块玻璃面板可以通过 EPDM 连接于直杆菱形网格上。预张紧的连续索可以斜交连接于菱形网格上,对网格起稳定的交叉支撑作用,如图 1-18 所示。图 1-18(a) 中的庭院中,现代的极轻的通透玻璃屋面覆盖了古老的厚重的砖结构,达成了完美的协调。



(a) 汉堡城市历史博物馆庭院



(b) 某网格结构

图 1-18 网格结构

五、索网结构

图 1-19 所示为一宽 40m、高 25m 的玻璃—索网结构。玻璃面板通过角板连接于索网上。

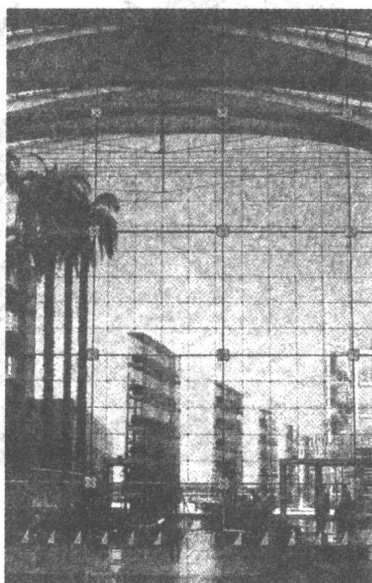


图 1-19 索网玻璃结构

六、全玻结构

对屋面和墙面通透性的不懈追求,必然导致取消所有金属支承单元的全玻结构的发展。近年来,已有许多建筑师和结构工程师致力于全玻结构的研究和实践。当然,这一领域有所进展的前提条件是玻璃工业的发展和人们对玻璃作为结构材料的深入理解。