

# 玻璃外墙结构在工程中的应用

顾正军

同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司 上海 200092

**摘要:** 玻璃外墙结构指的是一种由玻璃组成的建筑外立面墙体,其形式多样。按照安装方式可分为坐地式和吊挂式;按照结构类型可分为无肋式和有肋式;按照玻璃形状可分为平板式和曲面式。本文将对以上几种类型进行分析,分别探讨其各自的优点、缺点以及应用方法。

**关键词:** 玻璃、玻璃肋、结构、弯弧玻璃

## 引言

随着经济、文化和幕墙技术的快速发展,建筑外立面的造型越来越多样化和异形化。人们对建筑外观的要求也越来越高。为了提高建筑的通透性,玻璃幕墙龙骨做得越来越细且个性化。有些甚至完全取消了金属龙骨。本文将中国卫星网络集团有限公司雄安新区总部大楼项目为例,分享一下无金属龙骨的玻璃幕墙设计。

## 1 工程概况

该项目位于雄安新区启动区D01-08-19地块,南侧为城市道路、东北西三侧为中央绿谷。整个建筑由A、B、C、D、E五座组合而成。A座居于形体正中,正对城市轴线;西侧B座朝向城市界面,形成对外展示界面;东侧C座朝向绿谷景观,保障私密与安全的同时强调与景观的互动;西侧为D座;东侧为E座。

## 2 玻璃墙结构

为打造总部大楼成为千年大计雄安新区的生态地标,建筑方案以“花绽雄安、星耀华夏”为设计理念。A座入口门厅正对城市轴线,是整个建筑的门户和颜值担当。为突显建筑轻盈飘逸的科技感,弧形大雨篷下方的大厅外立面摒弃了金属龙骨和其他不透明的建筑元素,采用全玻璃外墙,实现极致简约现代通透。

大厅外立面形状呈异形设计,随着弧形雨篷高低起伏而变化,高度从左往右由4.5米到7米不断升高,再由7米至4.5米渐渐降低。因此,作为外墙主要材料的玻璃面板需满足最大高度为7米,宽度按主体结构柱距平均分成4份,每块宽度为2.1米。那么,用一块2.1宽7米高的玻璃作为外墙,需要选用何种配置的玻璃才能满足建筑幕墙的正常使用功能呢?

本项目位于雄安新区,地处华北地区的雄安新区位于北纬中纬度地带,属于暖温带季风型大陆性气候。冬季寒冷,累年最冷月平均温度为-10~0°C,因此冬季保温性能至关重要。为此,我们需要采用中空玻璃。另外,玻

璃的最大面积为 $2.1 \times 7 = 14.2$ 平方米,超过了《建筑玻璃应用技术规程》中单片安全玻璃的限值6平方米,所以夹层玻璃是必需的。综合以上两点,本项目的玻璃需要采用夹层中空玻璃。那么具体厚度如何确定呢?

玻璃的厚度除了需要满足保温、安全、加工和安装的要求外,还需要承受风荷载和地震荷载。由于玻璃是轻质结构,因此地震荷载相对于风荷载的影响较小。受篇幅限制为简便论述,本文仅以风荷载作为建筑外立面的水平荷载进行分析。本项目位于郊区,风荷载地面粗糙度为B类,门厅最大标高为7米,可以偏安全的取10米标高位置的阵风系数 $\beta_{gz} = 1.70$ 和高度变化系数 $\mu_z = 1.0$ ,雄安新区的基本风压 $\omega_0 = 0.40\text{kPa}$ ,体型系数 $\mu_s = 1.60$ ,根据这些参数,风荷载标准值 $\omega_k = \beta_{gz} \cdot \mu_z \cdot \mu_s \cdot \omega_0 = 1.09\text{kPa}$ 。风荷载设计值 $\omega = \gamma_w \cdot \omega_k = 1.63\text{kPa}$ ,其中 $\gamma_w$ 为风荷载的分项系数,取1.5。通过风荷载可以预选玻璃厚度,为了方便计算,假定立面玻璃采用的是单片玻璃。因为玻璃面板只有上下边有主体结构可以约束,所以受力模型是对边支承的板,玻璃面板的跨距为7米,根据经验分析,对边支承的玻璃通常会出现挠度问题。可以通过用挠度限值预选玻璃厚度。玻璃的挠度限值 $d_{lim} = L/60 = 7000/60 = 117\text{mm}$ ,实际挠度值 $d_f = 5 \cdot \omega \cdot B \cdot H^4 / 384 \cdot E / D$ ,其中B为玻璃宽度(即玻璃受荷宽度),H是玻璃高度(即玻璃跨度),E为玻璃弹性模量, $D = B \cdot t^3 / 12$ 为玻璃刚度。将D转化为B和t,得到公式 $d_f = 12 \cdot \omega \cdot H^4 / 384 \cdot E / t^3$ ,由此可得 $t^3 = 12 \cdot \omega \cdot H^4 / 384 \cdot E / d_f$ ,将 $d_f$ 用 $d_{lim}$ 代入公式,得到: $t^3 = 12 \cdot 1.09 \cdot 7^4 / 384 \cdot 72000000 / 0.117 = 48452\text{mm}^3$ ,解得: $t = \sqrt[3]{48452} = 36.5\text{mm}$ ,因此,玻璃厚度需要不少于37mm才能抵抗风荷载。因玻璃的配置需要夹层中空玻璃,如果夹胶片采用经济型的PVB夹胶片,中空层使用氩气,则夹层中空玻璃的等效厚度 $t_e = 0.95 \sqrt[3]{n \cdot t^3}$ ,其中n为玻璃数量,如果将单片玻璃厚度t定为12mm,按照上述公式可以得出 $n = 34$ ,至少需要34片12mm厚单片玻璃组合而成夹

层中空玻璃的等效厚度才能达到37mm，满足玻璃幕墙的抗风要求。而34片12mm厚单片玻璃组合成夹层中空玻璃总厚度约为460mm，超出了普通砌体墙的厚度200mm，也超出了结构梁的宽度300mm，显然用其作为建筑外墙，在加工、运输和安装上均很难实现，且占用了建筑室内空间。因此，该方案在实际工程中基本无法应用。

为了减少玻璃厚度，需要加强夹层玻璃的刚度，于是采用粘结性和刚度远高于PVB胶片的离子性胶片（SGP胶片）做夹层，由SGP胶片组合成的夹层中空玻璃的等效厚度 $t_e = 0.95^3 \sqrt{nr^3 + 12TI_s}$ ，根据公式推导，5片12mm厚单片玻璃组成的夹层中空玻璃的等效厚度就可以达到37mm，满足玻璃幕墙的抗风要求。玻璃的详细配置为12+1.52SGP+12+1.52SGP+12+12Ar+12+1.52SGP+12夹层中空玻璃，总厚度降低到了77mm。采用此玻璃做建筑立面，建筑效果通透，其承载力和保温性能均能满足要求。但是，由于国内还未大量生产应用SGP胶片，多为进口品牌且价格偏高，上述配置的玻璃材料单价大约为1万/m<sup>2</sup>，那么单块玻璃的造价就是14.7万元。对于这样的造价在国内除了苹果店，一般的甲方很难接受。此外，相对于普通幕墙，这种玻璃还是太厚，加工、运输和安装的难度加大，竣工以后的维护和更换也很困难。

### 3 肋式玻璃幕墙结构

针对上述问题，如果要降低造价，采取的首要措施就是减小玻璃厚度。要减小玻璃厚度，方法之一就是减小玻璃跨度，而主体结构层高不变，只能通过增加约束减小玻璃跨度，其中最有效的方式就是给玻璃的长边设置约束，在尽量不改变建筑外立面的通透效果的情况下，给玻璃的长边设置透明玻璃肋作为玻璃面板的支承，此时玻璃面板的受力模型便由原来短边方向的对边支承变成长边方向的对边支承，玻璃面板的跨度由7米缩小到2.1米，便可大大降低玻璃的厚度。设置玻璃肋之后，玻璃面板的挠度限值为 $d_{lim} = L/60 = 2100/60 = 35\text{mm}$ ，通过挠度公式和刚度公式的对比推导，可以粗略算出玻璃厚度

$t = \sqrt[4]{\frac{L_2^4}{L_1^4} * t_1^4} = \sqrt[4]{\frac{2.1^4}{7^4} * 36^4} = 10.8\text{mm}$ ，其中 $L_1$ 为原玻璃跨度， $L_2$ 为现玻璃跨度， $t_1$ 为原玻璃厚度。玻璃厚度能减小到12mm > 10.8mm，就可满足要求。对12mm厚玻璃的强度和挠度进行验算验证一下上述推导。玻璃的应力 $\sigma = 6 * m * q * a^2 * \eta / t^2 = 35.94\text{MPa}$ ，小于玻璃的边缘强度67MPa，强度满足要求，其中 $m = 0.125$ ， $q = 1.63\text{kPa}$ ， $a = 2.1\text{m}$ ， $\eta = 0.94$ 由 $\theta = \omega k * a^4 / E / t^4 = 14.2$ 确定。玻璃的挠度 $d_f = \mu * q_k * a^4 * \eta / D = 23.96\text{mm}$ 小于 $d_{lim} = 35\text{mm}$ ，玻璃挠度满足要求，其中挠度系数 $\mu$ 取0.013， $D = E * t^3 / 12 / (1 - \nu^2) = 10800000\text{MPa}$ ，

玻璃弹性模量 $E = 72000\text{MPa}$ ，玻璃泊松比 $\nu = 0.2$ 。由上可知，增设玻璃肋之后，玻璃面板可以采用等效厚度为12mm的中空夹层玻璃，12mm厚玻璃可以等效为8+1.52PVB+8+12Ar+8+1.52PVB+8双夹层中空玻璃，玻璃肋采用12+1.52PVB+12mm的夹层玻璃，玻璃肋高度

$$h_r = \sqrt{\frac{3 * \omega * B * H^2}{4 f_g t}} = \sqrt{\frac{3 * 1.63 * 2.1^2}{4 * 59000 * 0.024}} = 0.298\text{m}$$

其中 $f_g$ 为玻璃的

端面强度59MPa。可以取玻璃肋的宽度为350mm，则玻璃肋的挠度 $d_f = 5 * \omega k * B * H^4 / 32 / E / t / h_r^3 = 12\text{mm}$ 小于玻璃肋的挠度限值 $d_{lim} = L/300 = 7000/300 = 23\text{mm}$ ，玻璃肋满足抗风要求。于是原12+1.52SGP+12+1.52SGP+12+12Ar+12+1.52SGP+12夹层中空玻璃墙转变为8+1.52PVB+8+12Ar+8+1.52PVB+8夹层中空玻璃和12+1.52PVB+12mm夹层玻璃肋（350mm宽）组成的玻璃外墙结构。玻璃面板和玻璃肋组合后的综合单价大约为2000元/m<sup>2</sup>，材料价格比原方案的10000元/m<sup>2</sup>大大降低。同时加工和施工难度也是大大降低。虽然室内增设了玻璃肋之后，室内效果没有原方案简洁，但是对整个建筑的外立面效果影响不大，是一种可行的方案。

当玻璃厚度减少时，可能会导致采用坐式安装的玻璃幕墙出现平面外失稳和变形的问题，从而影响美观。为了满足构造要求，《玻璃幕墙工程技术规范》限定等效厚度为12mm的坐式玻璃最大高度只能达到4米。然而现在的玻璃高度已经达到了7米，因此需要将幕墙安装方式调整为吊挂形式。这就意味着在玻璃面板和玻璃肋上部需要增设夹具，增加了构造复杂度。由于幕墙需要吊挂在主体结构上，对上部主体结构的要求也相应提高。但是本项目门厅上部是钢结构雨篷，其竖向刚度并不大，不利于作为玻璃幕墙吊挂点。因此，如果采用此吊挂方式，还需要在幕墙上端加设混凝土结构梁，增加了额外的构造和成本。

### 4 弯弧玻璃墙结构

如果要在保持坐式安装的情况下减小玻璃厚度，除了减小玻璃跨度外，还可以通过增加玻璃的刚度来实现。玻璃的刚度与玻璃厚度和材料性质相关，如果两者不变，只能改变玻璃形状以提供更好的刚度。观察整个建筑的造型和几何元素，我们发现A、B、C、D、E座各单体的每个转角都采用了弧线过渡，每个单体之间的平面连接也是采用弧线连接。此外，A、B、C座三个单体的主立面(南立面)连接均采用弧线连接，A座南立面的装饰条和大雨篷也采用了弧形。大量的弧线运用体现了建筑现代感。既然建筑中采用了这么多弧形元素，那么同

样可以将平板玻璃进行弯弧处理成弧形玻璃。经过弯弧处理后,玻璃截面的抵抗矩和惯性矩增大,同时稳定性也得到加强,不会在自重作用下产生变形。采用弧形的薄板玻璃不仅可以取消室内玻璃肋,还可以采用坐式玻璃幕墙的形式,无需额外增设吊挂结构。弧形玻璃的外形也呼应了整个建筑的弧形元素。

经过弯弧处理后,玻璃的刚度得到显著提升,这也使得强度成为控制其抗风性能的关键因素。为了确定合适的弯弧程度以满足要求,我们可以根据公式 $\sigma = q \cdot B \cdot H^2 / 8 / W$ ,推导出 $W = q \cdot B \cdot H^2 / 8 / f_g$ 的计算公式,其中钢化玻璃边缘强度 $f_g = 67 \text{MPa}$ ,带入数值到公式中,则 $W_{lim} = 312924 \text{mm}^3$ ,如果将宽为2.1米、等效厚度为12mm的玻璃弯成矢高为100mm的弧形玻璃,那么截面抵抗矩W就可以达到 $315852 \text{mm}^3 > 312924 \text{mm}^3$ ,满足强度要求。同时,验算弧形玻璃的挠度 $d_f = 5 \cdot \omega \cdot B \cdot H^4 / 384 / E / I = 43 \text{mm} < 117 \text{mm}$ ,其中玻璃的抵抗矩I为 $22928584 \text{mm}^4$ ,挠度满足要求。等效厚度为12mm的玻璃为8+1.52PVB+8+12Ar+8+1.52PVB+8双夹层中空玻璃。如果弯弧更大一些,玻璃厚度还可以进一步降低,如果将宽为2.1米、等效厚度为9mm的玻璃弯成矢高为140mm的弧形玻璃,那么截面抵抗矩W就可以达到 $342584 \text{mm}^3 > 312924 \text{mm}^3$ ,满足强度要求。同时,验算弧形玻璃的挠度 $d_f = 5 \cdot \omega \cdot B \cdot H^4 / 384 / E / I = 30 \text{mm} < 117 \text{mm}$ ,其中玻璃的抵抗矩I为 $33392067 \text{mm}^4$ ,挠度满足要求。等效厚度为

9mm的玻璃为6+1.52PVB+6+12Ar+6+1.52PVB+6双夹层中空玻璃。

通过以上分析,这种玻璃外墙可以采用矢高为100mm以上的8+1.52PVB+8+12Ar+8+1.52PVB+8双夹层中空玻璃或矢高为140mm以上的6+1.52PVB+6+12Ar+6+1.52PVB+6双夹层中空玻璃做面板,无需设置繁杂的吊挂夹具和玻璃肋,安装简便。弯弧后的价格约为 $2400 \text{元}/\text{m}^2$ ,与吊挂肋式玻璃幕墙相当,也是一种可行方案。

## 5 结束语

综上所述,当建筑外立面采用玻璃墙时,可以获得最佳的通透效果。然而,造价较高且安装和维护难度大,因此适用于文化和地标性建筑。采用肋式玻璃幕墙能够提供良好的室外效果,但室内效果一般,成本相对较低,有一定程度的安装难度,适用于商业和办公建筑等。而采用弧形玻璃墙能够在保证良好建筑效果的同时降低成本并简化安装过程,适用于具有特殊造型的建筑。

## 参考文献

- [1]《玻璃幕墙工程技术规范》JGJ102-2003, 2003-11-04
- [2]《建筑玻璃应用技术规程》JGJ113-2015, 2015-08-21
- [3]《建筑幕墙工程技术标准》DG/TJ08-56-2019,2019-12-05