

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.06.042

特殊支撑中空玻璃的柔度算法

刘斌¹, 符旭晨^{1,2}, 王谊敏^{1,2}

(1. 浙江中南建设集团有限公司, 浙江 杭州 310000;

2. 浙江中南幕墙科技股份有限公司, 浙江 杭州 310052)

摘要: 四边支撑外加长向跨中支撑连续中空玻璃的计算问题是现行幕墙规范无法解决的, 但却在幕墙行业进行幕墙或采光顶加固补救处理中经常碰到。从理论角度探讨了这类中空玻璃受力模式, 提出了中空玻璃的柔度算法。同时结合有限元程序的使用, 精确推导出外部荷载在上下两片支撑方式完全不同的中空玻璃的分配问题, 为工程实践中碰到的类似问题提供理论支持。

关键词: 空气层; 气压; 荷载分配; 体积柔度; 刚度

中图分类号: TU382

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)06-0218-04

Analysis of the Special Supporting Way of the Insulating Glass with the Flexibility-based method

LIU Bin¹, FU Xuchen^{1,2}, WANG Yimin^{1,2}

(1. Central South Construction Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000, China;

2. Zhongnan Curtain Wall Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310052, China)

Abstract: This paper analyzed the force condition of the insulating glass with quadrilateral bearing and the middle diaphragms, which could not be solved by the current codes. However, it is a common problem for the reinforcement and remedy of the curtain wall and lighting roof. Combined with the theoretical derivations and the finite element software SAP2000, the distribution problems of the external forces of two insulating glasses with different support patterns are calculated accurately, which could provide reference for the engineering practice.

Keywords: air layer; air pressure; load distribution; volume flexibility; stiffness

近年来,新世纪国际建筑的原则逐渐定义为舒适、自然、环保与节能,其中建筑节能逐渐成为世界性潮流。门窗和幕墙作为建筑节能最大潜力的构件,节能玻璃成为非常关键的环节^[1-2]。中空玻璃作为一种性能良好的玻璃结构,广泛应用于我国新建居民和商业建筑中^[3]。目前,专家学者对中空玻璃的应用理论研究相对深入完善^[4-9],并建立了科学的产品质量检测规程^[10-12]。然而对于一些特殊支撑方式的中空玻璃荷载传递机制,现行规范无法较好解决。

浙江义乌某项目采光顶于2012年完成施工,交付一年内出现玻璃大面积破损,基于拟定处理方案过程中产生的争议,本文对该特殊支撑方式下采光

顶中空玻璃的受力模式及传荷机制进行计算分析。

1 中空玻璃的承载特性

浙江义乌某项目采光顶玻璃分格尺寸为2 m × 1.8 m,采用6(low-e) + 12A + 6 + 1.52PVB + 6刚化中空夹镀膜玻璃,2012年完成施工,项目交付一年内出现玻璃大面积破损。经过分析,初步判断为采光顶分格过大,玻璃厚度不足所致。如图1所示,制定加固补救处理方案:在2 m × 1.8 m玻璃分格的2 m跨度正中间增加一根支撑矩形钢管。

针对该采光顶中空玻璃的受力模式及传荷机制产生的争议进行理论分析,多层玻璃受力分析的核心问题在于荷载在各层玻璃之间的分配问题。根据

玻璃幕墙有关规范^[11-13],不管中空玻璃还是夹层玻璃,荷载主要依据各层玻璃的刚度比进行按比例分配。鉴于玻璃的平面外弯曲刚度同玻璃厚度的三次方成正比,因此荷载在各层玻璃之间的分配仅与各层玻璃的厚度有关。定性分析中空玻璃的荷载分配问题前依据规范作出两个基本假定:(1) 上层玻璃上的荷载全部由空气层传递;(2) 密闭空气层的下层玻璃以及四边两层玻璃之间的连接体为刚性的不变形体。由此建立中空玻璃力学模型,如图 2 所示,其中, P_0 为标准大气压(取值为 1.01×10^5 Pa); ΔP 为外荷载产生密闭空气层内压力的变化量; ΔP_1 为上层玻璃变形产生密闭空气层内压力的变化量; ΔP_2 为下层玻璃变形产生密闭空气层内压力的变化量; P 为作用在玻璃上的恒载(取值为 0.5 kPa); Q 为作用在玻璃上的活载(取值为 0.5 kPa)。

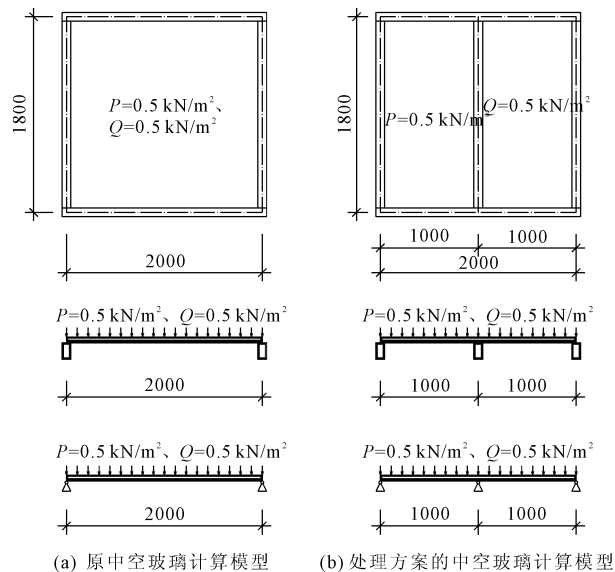


图 1 采光顶中空玻璃计算模型示意图

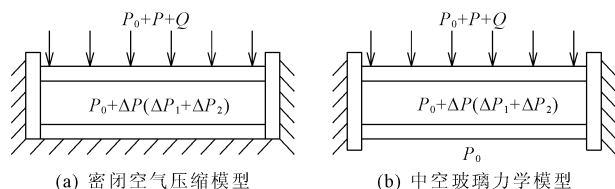


图 2 采光顶中空玻璃受力分析图

如图 2(a)所示的中空玻璃密闭空气压缩模型,在忽略四边支撑对玻璃的支撑作用的情况下,玻璃要实现最终的受力平衡,必须满足:

$$P_0 + P + Q = P_0 + \Delta P \quad (1)$$

即,

$$P + Q = \Delta P \quad (2)$$

式中: P_0 为标准大气压(取值为 1.01×10^5 Pa); ΔP

为外荷载产生密闭空气层内压力的变化量; Q 为作用在玻璃上的活载(取值为 0.5 kPa)。

由基本假定二可以确定,除上层玻璃外,密闭空气层的另外五个支撑面均为刚性无变形体。根据理想气体定律(克拉伯龙方程) $PV/T = nR$, 令 $V = SH$, 则

$$PH = RT/S = C \quad (3)$$

式中: V 为密闭层体积; S 为玻璃面积; H 为密闭空气层厚度; T 为热力学温度; n 为气体摩尔数(仅同密闭气体的分子数有关); R 为摩耳气体常数; ΔH 为空气层压缩量(负值); C 为常量。

结合式(2)和式(3),可以得出

$$P_0H = (P_0 + \Delta P)(H + \Delta H) = (P_0 + P + Q)(H + \Delta H) \quad (4)$$

现将标准大气压值,恒活荷载以及密闭空气层原初厚度(取值为 0.012 m)代入公式(4)中,可计算出空气层压缩量为 $\Delta H = -1.173 \times 10^{-4}$ m。

上述计算结果是基于规范给定的两条基本假定推导计算而来。在实际工程中,如图 2(b)所示,作用在上片玻璃的荷载会有一部分直接通过四边支撑传递,下层玻璃会在密闭空气层内压增加的时候产生一定的下挠作用来释放一定的内压,这会导致内压减小,实际的空气层压缩量也会小于理论计算结果 $\Delta H = -1.173 \times 10^{-4}$ m。由于理论计算结果同中空玻璃一般允许极限变形量($L/60$, L 为中空玻璃短跨长度,本算例为 0.03 m)相比不超过 4‰,并且与最小空气层厚度(0.012 m)相比不足 1%,因此可认为上下层玻璃在变形上是协调的(即不考虑空气层自身的压缩变形量,同时由于上下层玻璃受金属骨架框架的支撑方式是相同的,故上下层玻璃的变形趋势是一致的,各点的位移变形是协调的,位移的协调导致上下层玻璃变形的体积亦为协调的);在上下层玻璃变形协调共同承担荷载的情况下(类似单元式幕墙的梁柱),荷载 $P + Q$ 的分配在两层玻璃之间是按刚度分配的。

2 有限元分析

2.1 柔度计算法

为了更真实合理地模拟中空玻璃在实际工程中的荷载传递和分配问题,本文结合有限元软件 SAP2000 进行分析计算^[14-15]。首先确定三个基本假定:(1) 玻璃内部空气层自身无压缩变形;(2) 玻璃的受力变形是线性的;(3) 相对于玻璃的变形,框骨架变形差量(边骨架和中骨架变形差量)可忽略,

均可视为不动支座。如图 1(b)所示,可以认为荷载在上下片玻璃之间是按刚度分配的,有别于常规玻璃,本算例的中空玻璃下片在长跨中增加一道支撑,导致下层玻璃刚度的计算会相当复杂,本文采用柔度计算方法有效解决这一问题。

在运用柔度计算法的过程中仍会出现一些亟待解决的问题:下层玻璃柔度的不均一性(上层玻璃的柔度与其最大变形呈线性关系,但下层玻璃支撑方式的复杂性导致上下层玻璃间的柔度与线变形的比例不等值);根据基本假定得出上下层玻璃之间的空气层无压缩,因此上下层玻璃的体积变形协调,但本算例中下层玻璃增加了一道中间支撑,使得上下层玻璃同一点处的位移变形不再协调。因此我们引入变形体积柔度有效解决上述问题,其中体积柔度为单位力所能使玻璃产生的体积变形,即单位力作用下玻璃下挠弯曲变形时扫过的空间体积量。鉴于玻璃受力变形是线性的,故变形体积柔度与荷载分量的乘积为恒定值,并且与玻璃的变形程度无关。因此可得,

$$\Delta V = V_1 - V_2 = 0 \quad (5)$$

即,

$$P_1 f_{V_1} = P_2 f_{V_2} \quad (6)$$

式中: V_1 和 V_2 分别为在分配荷载作用下上下层玻璃的变形体积量; P_1 和 f_{V_1} 为上层玻璃所分担的荷载分量与体积柔度; P_2 和 f_{V_2} 为下层玻璃所分担的荷载分量与体积柔度。

公式(6)可以变形处理为,

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{f_{V_2}}{f_{V_1}} = \frac{V_{02}}{V_{01}} = \frac{\int f_2(x, y) dx dy}{\int f_1(x, y) dx dy} \quad (7)$$

式中: V_{01} 和 V_{02} 分别上层玻璃和下层玻璃在单位荷载作用下的体积变形量。

运用有限单元法对公式(7)进行数值离散化处理为:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{f_{V_2}}{f_{V_1}} = \frac{V_{02}}{V_{01}} = \frac{\int f_2(x, y) dx dy}{\int f_1(x, y) dx dy} = \frac{\sum f_2(x, y) dx dy}{\sum f_1(x, y) dx dy} \quad (8)$$

若上下层玻璃采用相同分格的有限单元划分,同时令 $\lambda = f_{V_2}/f_{V_1}$, 公式(8)可简化为:

$$\lambda = \frac{P_1}{P_2} = \frac{\sum f_2(x, y)}{\sum f_1(x, y)} \quad (9)$$

公式(9)可理解为上下层玻璃的荷载分配比等于相同荷载作用下层与上层玻璃的柔度比,即相同荷载作用下的体积变形比。同时式(8)经变形处理可得:

$$\lambda = \frac{P_1}{P_2} = \frac{P_1}{P_t - P_1} = \frac{f_{V_2}}{f_{V_1}} \lambda \quad (10)$$

即,

$$P_1 = \frac{\lambda}{1 + \lambda} P_t; P_2 = \frac{1}{1 + \lambda} P_t \quad (11)$$

式中: λ 为下层和上层玻璃柔度比; P_t 为作用在中空玻璃上的总荷载。

至此,本文解决了外部荷载在此类支撑形式下上下层玻璃的分配问题,下面依据实际工程的实际算例进行中空玻璃受力计算。

2.2 算例分析

本算例中的 6(low-e) + 12A + 6 + 1.52PVB + 6 中空玻璃,上片玻璃为 0.006 m 厚四边简支支撑,下片玻璃为 6 + 1.52PVB + 6 夹胶玻璃,弹性模量 $E = 0.72 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,泊松比 $\nu = 0.2$ 。由于骨架对下片夹胶玻璃的支撑方式是相同的,根据《玻璃幕墙工程技术规范》^[11](JGJ102-2003)和《采光顶及金属屋面技术规程》^[13](JGJ255-2012)提供的简化方法为运用 0.00756 m 厚单层四边及长跨中间支撑玻璃受力模式进行有限元计算。计算模型施加 0.5 kN/m^2 的均布荷载,上下层玻璃均采用相同大小的单元分格尺寸 $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$,采用薄壳单元,单元个数为 180 个,节点数量共 399 个。计算结果如图 3、图 4 所示。

图 3(a)和图 3(b)分别为上层玻璃的应力云图和变形云图,上层玻璃最大应力 $\sigma_{1\max} = 3.85 \text{ MPa} < 42 \text{ MPa}$,满足规范要求^[11,13], $\sum f_1(x, y) = -2.894 \text{ mm} = -2.894 \text{ m}$,上层玻璃最大变形 $U_{1z\max} = -19.27 \text{ mm} = -0.01927 \text{ m}$ 。图 4(a)和图 4(b)分别为下层玻璃的应力云图和变形云图,下层玻璃最大应力 $\sigma_{2\max} = 12.1 \text{ MPa} < 42 \text{ MPa}$,满足规范要求, $\sum f_2(x, y) = -19.274 \text{ mm} = -0.019274 \text{ m}$,下层玻璃最大变形 $U_{2z\max} = -0.8963 \text{ mm} = 8.963 \times 10^{-4} \text{ m}$ 。根据公式(9)可得,

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\sum f_2(x, y)}{\sum f_1(x, y)} = 0.667\%$$

由此可以得出上层玻璃所分担的荷载仅占下层玻璃的 0.667%,基本可以忽略不计,即全部的荷载全部施加在下层夹胶玻璃上,上层玻璃相当于平放在一层无压缩空气垫层上,只起到中间传力作用,无任何的弯曲变形。

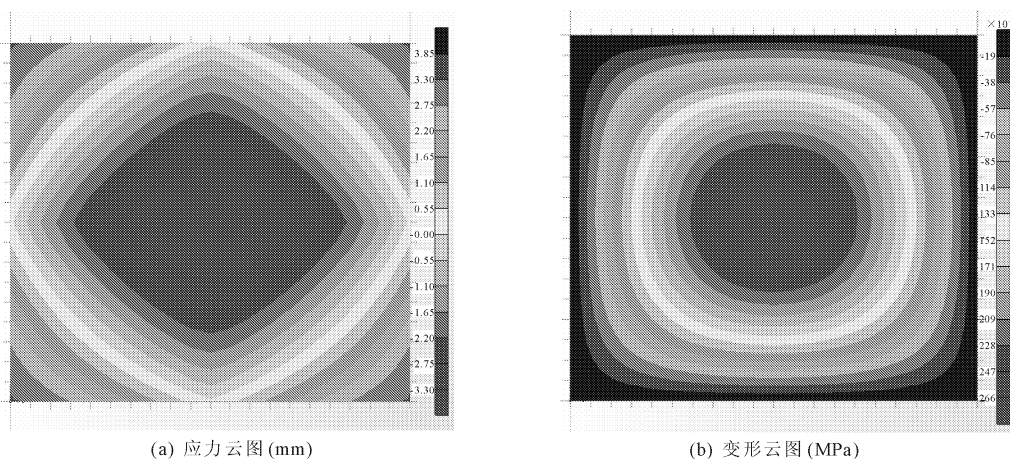


图 3 上层玻璃计算结果

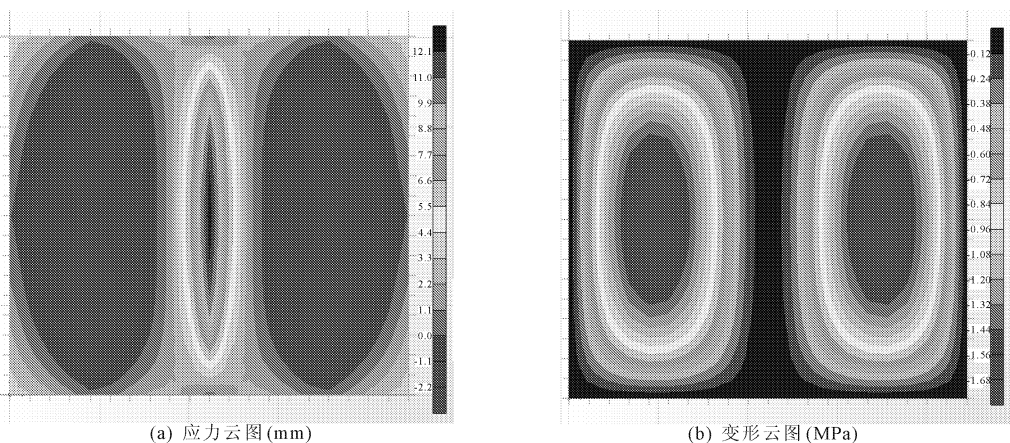


图 4 下层玻璃计算结果

由于本案例为事故处理,对采光顶玻璃面板的加固处理,事先无法预选各层玻璃的厚度。若在某些设计中,特别是超大玻璃分格尺寸的中空玻璃选用该类支撑形式,初选玻璃型号时下层玻璃的厚度小于上层玻璃,可以充分发挥材料的强度,减少材料的使用量。在相同的材料使用量条件下,采用一些特殊的材料和形式,如 T 型玻璃肋来做中间支撑横梁,可以保证幕墙设计效果与经济成本相兼顾。

3 结 论

本文以实际工程中采光顶中空玻璃的加固处理案例为研究对象,从理论推导和有限元软件计算角度对采光顶中空玻璃荷载分配问题进行了深入探讨,得到以下结论:

(1) 基于有关幕墙规范进行理论推导得出的理论空气层压缩量是相对保守的,但与中空玻璃一般允许极限变形量和最小空气层厚度相比较,可认为上下层玻璃在变形上是协调的,有效地证明了幕墙规范中荷载分配与刚度有关。

(2) 为了真实有效地模拟实际工程中中空玻璃的荷载问题,引入柔度计算法,运用有限元软件 SAP2000 计算了中空玻璃上下层玻璃的应力和位移结果,有效地解决了上下层玻璃的荷载分配问题,并给出了中空玻璃上下层玻璃厚度的选择建议。

(3) 实际上,本文空玻璃柔度法计算方式适用于任何形式的中空玻璃,包括上下片的采用不同支撑方式,而并不限于前文的下片长向跨中增加支撑。同样适用于变厚度(包括局部加肋增厚)等特殊处理的中空玻璃。这样,现行规范所采用的刚度计算法就可以视为此计算方法在上下片玻璃均为等厚度,且均为相同支撑方式的特殊条件下的简化算法。

参考文献:

[1] Feng Ruoqiang, Ye Jihong, Wu Yue, et al. Mechanical behavior of glass panels supported by clamping joints in cable net facades [J]. International Journal of Steel Structures, 2012, 12(1): 15-24.

(上接第 221 页)

- [2] Xu Nuwen, Tian Li, Dai Feng. Research on energy-saving technology of housing colony of Yangling[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 361/363: 323-326.
- [3] 刘小根, 包亦望, 邱岩, 等. 幕墙中空玻璃失效在线检测技术[J]. 土木工程学报, 2011, 44(11): 52-58.
- [4] 吴晓, 杨立军, 黄羽. 风荷载作用下中空幕墙玻璃的非线性弯曲[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(1): 304-309.
- [5] 胡小勇. 高速列车站玻璃幕墙结构模型动力试验[J]. 武汉大学学报(工学版), 2012, 45(5): 612-618.
- [6] Shi Gang, Zuo Yong, Shi Y, et al. Influence of damages on static behavior of single-layer cable net supported glass curtain wall: full-scale model test[J]. Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, 2010, 4(3): 383-395.
- [7] 陶照堂, 吴涛. 四边支撑拱形夹胶玻璃的计算[J]. 门窗, 2015(12): 37-39.
- [8] 毛仕方. 预应力索桁架点支式弧形玻璃幕墙施工技术[J]. 中国建筑金属结构, 2013, 18(8): 83-84.
- [9] 刘小根, 包亦望, 宋一乐, 等. 青藏铁路客车中空玻璃低压研究及可靠性设计[J]. 铁道车辆, 2010, 48(2): 4-9.
- [10] 王敬丽, 李宁. 玻璃幕墙风荷载设计研究[J]. 四川建筑, 2012, 34(2): 146-147.
- [11] 中华人民共和国建设部. 玻璃幕墙工程技术规范: JGJ 102-2003[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [12] Ventsel E, Krauthammer T. Thin plates and shells: theory, analysis and applications[M]. New York: Marcel Dekker, 2001: 136-139.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 采光顶及金属屋面技术规程: JGJ255-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [14] 张莉, 鲍子虞. 基于 SAP2000 的钢梁-钢筋混凝土柱混合框架的性能分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(4): 67-71, 90.
- [15] 张宏战, 谭杰骥, 马震岳. 基于 SAP2000 的进水塔结构静力弹塑性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(6): 64-68.