

文章编号: 1673-2049(2006)03-0045-05

# T 型组合受弯玻璃板的承载性能

王元清, 张恒秋, 石永久

(清华大学 建筑玻璃与金属结构研究所, 北京 100084)

**摘要:** 针对应用于玻璃楼梯、玻璃楼板等承载玻璃结构中的 T 型组合受弯玻璃板, 在特定的条件下结构会发生整体失稳而破坏, 其承载力由屈曲荷载控制, 而现有的玻璃幕墙规范中对这种结构形式没有相关规定的问题, 采用有限元方法分析了不同参数对 T 型组合受弯玻璃板静力承载性能的影响, 并对不同荷载状况下 T 型组合受弯玻璃板的稳定性问题进行分析, 得到了其屈曲荷载及屈曲模态。计算结果表明: 影响 T 型组合受弯玻璃板静力承载性能的主要因素为板厚、肋板高度和翼缘板宽度, 而影响其稳定性的主要因素为肋板高度和翼缘板宽度的比值。

**关键词:** T 型组合受弯玻璃板; 承载性能; 抗弯强度; 屈曲荷载; 有限元方法

**中图分类号:** TU524      **文献标志码:** A

## Bearing Properties of T-Type Combined Bending Glass Plate

WANG Yuan-qing, ZHANG Heng-qiu, SHI Yong-jiu

(Institute of Glass and Metal Structure for Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** T-type combined bending glass plate is more and more widely used in load bearing glass structure, such as glass stair and glass floor. Global buckling occurs under certain conditions and leads to structure damage, and the bearing capacity is defined by the buckling load, however current code has not specified the design method for this structure. Finite element method was used to do parametric analysis on T-type combined bending glass plate static bearing properties; meantime stabilization problems under different load cases were studied and buckling loads; buckling modes were obtained. The calculation results prove that the main factors affect the load bearing properties of this structure including the thickness of plate, height of glass rib and width of cover plate, and the main factor affected stability is ratio of width of glass rib to width of flange dominated the stabilization properties most.

**Key words:** T-type combined bending glass plate; load bearing property; bending strength; buckling load; finite element method

## 0 引言

近年来, 玻璃承载结构已经逐渐成为一种独立的承载结构形式, 玻璃梁、柱、板经常被应用于建筑

物的幕墙、顶棚、雨篷、走廊、门厅、地板、楼梯等结构中<sup>[1]</sup>。对于玻璃这种脆性建筑材料作为承载结构, 目前各国都缺乏较为详尽的设计理论, 现行玻璃幕墙规范中也仅将玻璃作为维护结构考虑而忽略其承

收稿日期: 2006-04-08

基金项目: KGE 科学研究基金项目(200505)

作者简介: 王元清(1963-), 男, 安徽霍山人, 副教授, 工学博士, E-mail: wang-yq@mail. tsinghua. edu. cn。

载性能<sup>[2-3]</sup>。实际上,目前应用于建筑领域的玻璃材料尤其是钢化玻璃及夹层玻璃都具有较高的强度和很好的力学性能<sup>[4]</sup>,完全可以作为承载结构来承担荷载。

在玻璃楼梯、玻璃地板等玻璃承载结构中,经常会用到 T 型组合受弯玻璃结构。不考虑失稳问题时,这种构件的承载力由肋板的侧面强度控制。在玻璃板的边缘处,由于切割产生的缺陷使其侧面强度比大面强度小很多,通常仅为大面强度的 70% 左右,而这种 T 型受弯玻璃板的最大应力往往出现于相对薄弱的边缘处,不利于承载<sup>[5]</sup>。

同时,当整个 T 型组合受弯玻璃构件缺少足够的侧向支承时,玻璃构件会在应力达到强度极限之前发生整体失稳而失去承载力<sup>[6]</sup>。在这种情况下,其承载力由玻璃构件的屈曲荷载作为控制因素。现行的玻璃幕墙规范中没有提供这种面内受弯玻璃构件的设计计算方法,因而有必要对这种构件的承载性能进行研究。

很多试验结果表明:工程中所用玻璃板在力学上可以看作是各向同性的弹性薄板。为得到较为精确的解,笔者采用有限元方法对 T 型组合受弯玻璃板的静力承载性能和稳定性问题进行了计算分析。

## 1 有限元计算模型与计算参数

### 1.1 基本假设

在计算时,假定板的厚度为常量,而板的材料为各向同性,平分板的厚度,称之为中平面;同时,在不影响结果精度的情况下,假设:

(1)垂直于中平面的正应力,与横截面内的应力相比是非常微小的,可以忽略;

(2)作用在板平面内由荷载所引起的应力,沿板的厚度均匀分布;

(3)板变形前位于与板的中平面相垂直的任意直线上,在板变形后仍位于与板的弹性曲面正交的直线上<sup>[7]</sup>。

### 1.2 有限元模型及材料参数

T 型组合受弯玻璃板在实际工程中常用于楼梯、楼板等承载结构中,这种构件通常由一块翼缘板和一块肋板通过结构胶或点式连接件连接在一起而组成,计算模型如图 1 所示。

对于肋板的力学响应问题,文献[8]中已经给出了较为详尽的分析方法,笔者主要考虑这种 T 型构件作为整体的受力,其玻璃的材料参数见表 1。

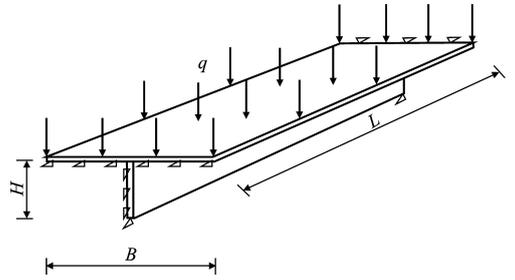


图 1 计算模型

Fig. 1 Calculation Model

表 1 玻璃材料参数

Tab. 1 Parameters of Glass Materials

弹性模量/Pa	泊松比	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )
$0.72 \times 10^{11}$	0.20	25.6

采用有限元计算软件 ANSYS 提供的结构静力分析模块及特征值屈曲分析模块,来求解模型中外荷载引起的应力变形响应及屈曲模态。

由于计算时需考虑应力刚化,所以本文中所选模型单元类型为三维实体单元,其形状类似正六面体,适合用于规则网格划分。网格划分时控制单元边长,以获得较高的精确度。

目前中国的玻璃结构中常用的玻璃厚度为 6、8、10、12、15 mm,组合受弯玻璃板的肋板高度一般在 200~500 mm,笔者选取这几种常见的玻璃尺寸进行计算。

## 2 静力承载性能分析

尽管玻璃是各向异性材料,但大量试验数据表明玻璃的各种力学响应都表现出各向同性材料的特点<sup>[9]</sup>。不考虑失稳的情况下,这种组合受弯玻璃板在荷载作用下的力学响应与 T 型梁类似。影响其应力及变形的因素主要是玻璃板的厚度  $t$ 、构件跨度  $L$  及肋板高度与翼缘板宽度的比值  $H/B$ <sup>[10]</sup>。

### 2.1 应力及位移的变化规律

考虑线荷载作用在肋板所在平面上的情况,此时 T 型组合受弯玻璃板的最大应力及位移均出现于肋板下边缘的中点处,其破坏由侧面强度控制。当 T 型组合受弯玻璃构件的跨度和截面尺寸为定值( $L \times B \times H \times t = 1\,500\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ )时,其最大应力及位移随荷载的变化趋势如图 2 所示。由图 2 可以看出:对于尺寸一定的 T 型组合受弯玻璃板,其最大应力及位移随着荷载的增加呈线性增长。

### 2.2 板厚的影响

选取  $L = 1\,500\text{ mm}$ ,  $H = 200\text{ mm}$ ,  $H/B$  分别为

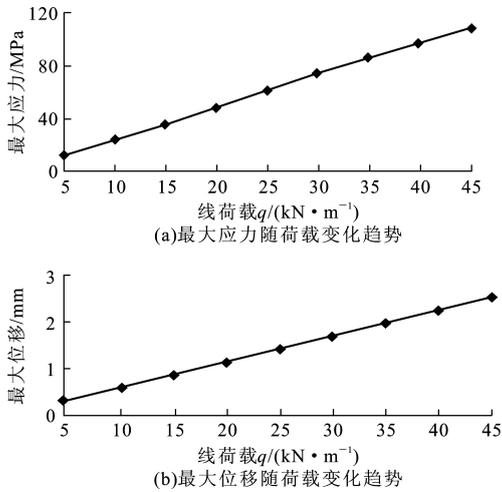


图2 应力、位移随荷载变化趋势

Fig. 2 Variation Tendency of Stress and Displacement vs Load

1/3、1/2、1的T型组合受弯玻璃构件计算其应力、位移随板厚增加而变化的趋势,施加的荷载均为  $q=10 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$  的均布线荷载,方向垂直于翼缘板并作用于肋板所在平面内。

通过有限元计算可知:当T型组合受弯玻璃板的其他参数为定值时,其最大应力及位移随板厚的变化趋势如图3所示。

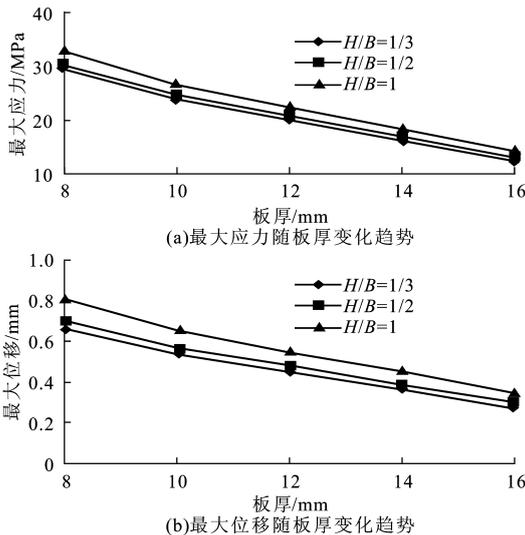


图3 应力、位移随板厚变化趋势

Fig. 3 Variation Tendency of Stress and Displacement vs Plate Thickness

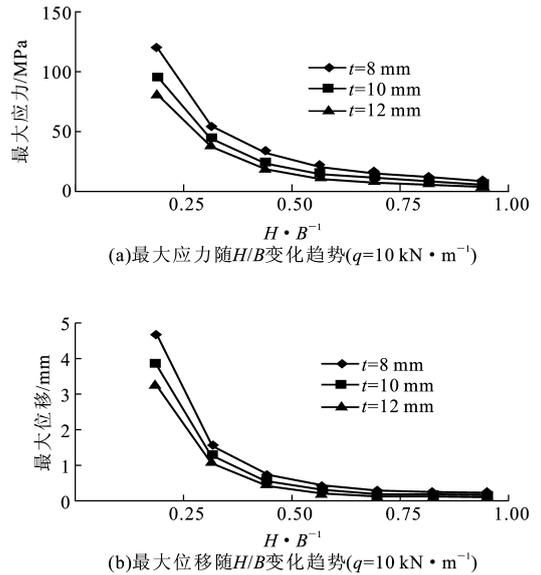
由图3可以看出:对于T型组合受弯玻璃板承受均布线荷载的情况,当玻璃板的跨度、肋高与翼缘板宽度比  $H/B$  为定值时,其应力及位移随着厚度增加而呈线性降低。

### 2.3 跨高比的影响

选用  $L=1500 \text{ mm}$ ,  $B=400 \text{ mm}$ , 厚度分别为

8、10、12 mm的T型组合受弯玻璃构件计算其应力、位移随  $H/B$  的变化趋势。施加的荷载均为  $q=10 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$  的均布线荷载,方向垂直于翼缘板并作用于肋板所在平面内。

当玻璃的厚度为定值时,其最大应力及位移随  $H/B$  的变化趋势如图4所示。

图4 应力、位移随  $H/B$  变化趋势Fig. 4 Variation Tendency of Stress and Displacement vs  $H/B$ 

由图4中可以看出:对于T型组合受弯玻璃板承受均布线荷载的情况,当玻璃板的厚度为定值时,其应力及位移随  $H/B$  增加呈类似抛物线形式降低。由图4还可以看出:当其他参数不变时,增加翼缘板的宽度对T型组合受弯玻璃构件承载力的提高效果并不明显,而增加肋板的高度却能显著提高其承载力。

## 3 稳定性分析

同钢结构一样,T型组合受弯玻璃结构同样也存在着稳定性问题,目前在各国已经进行了相关研究,但对于T型组合受弯玻璃板稳定性问题的研究还没有相关报道。笔者采用有限元方法对这种构件的稳定性问题加以分析,考虑工程实际情况,所加荷载均为均布线荷载。

### 3.1 有限元模型

在屈曲分析中所采用的模型如图5所示,为更方便地对比计算结果,选用跨度为  $1500 \text{ mm}$ ,肋板高度为  $200 \text{ mm}$ ,翼缘板宽度为  $400 \text{ mm}$ ,厚度为  $10 \text{ mm}$ 的T型组合受弯玻璃构件进行计算。计算软件采用ANSYS,模型单元选用三维实体单元,网格均匀划分。主要应用ANSYS的特征值屈曲模块

来计算 T 型受弯玻璃构件在理想情况下的屈曲荷载(欧拉荷载),并模拟其屈曲模态。

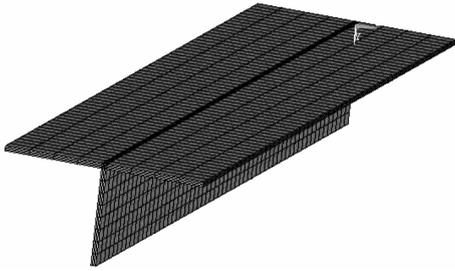


图 5 有限元模型

Fig. 5 Finite Element Model

### 3.2 屈曲模态

经有限元计算,可以得到 T 型组合受弯玻璃构件的第一屈曲模态,即其最可能发生的屈曲模态,如图 6 所示。

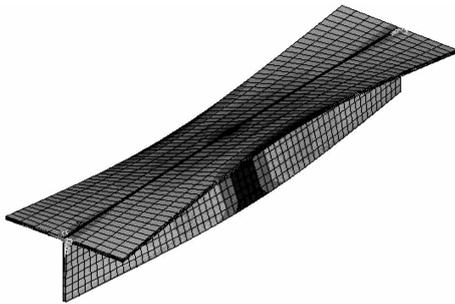


图 6 第一屈曲模态

Fig. 6 The First Buckling Mode

由计算结果可知:当 T 型组合受弯玻璃构件失稳时,翼缘板与肋板均发生翘曲,其形状均为半波状。

### 3.3 计算结果分析

设定 T 型组合受弯玻璃构件的跨度及板厚为定值( $L=1500\text{ mm}$ ,  $t=10\text{ mm}$ ),分别计算其在不同翼缘板宽度或肋板高度下的屈曲荷载及屈曲前应力,考察这两种因素对 T 型组合受弯玻璃构件稳定性问题的影响。

#### 3.3.1 翼缘板宽度对稳定的影响

取肋板高度为  $200\text{ mm}$ ,计算翼缘板宽度取不同值时 T 型组合受弯玻璃构件的屈曲荷载和屈曲前应力,计算结果如图 7、8 所示。

这种理想状态下计算出的屈曲荷载是实际 T 型组合受弯玻璃构件屈曲荷载的上限值,即当实际荷载超过此限值时,其必然发生失稳情况。

由图 7、8 中可以看出:随着翼缘板宽度的增加,屈曲荷载逐渐增大,屈曲前最大应力也随之增大。当  $H/B < 4.4$  时, T 型组合受弯玻璃构件中的翘曲前最大应力已经超过玻璃的极限强度,说明在理想

状态下,满足这一条件的 T 型组合受弯玻璃构件不会发生失稳情况。

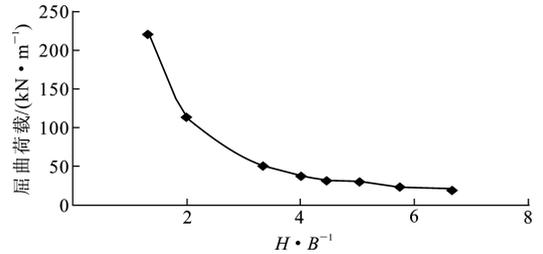


图 7 屈曲荷载随翼缘板宽度变化趋势

Fig. 7 Variation Tendency of Buckling Load vs Flange Width

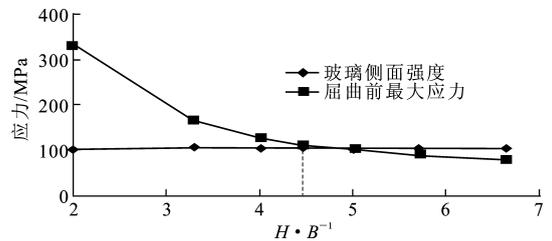


图 8 屈曲前应力随翼缘板宽度变化趋势

Fig. 8 Variation Tendency of Stress vs Flange Width Before Buckling

#### 3.3.2 肋板高度对稳定的影响

取翼缘板宽度为  $200\text{ mm}$ ,计算不同肋板高度时 T 型组合受弯玻璃构件的屈曲荷载和屈曲前应力,计算结果如图 9、10 所示。

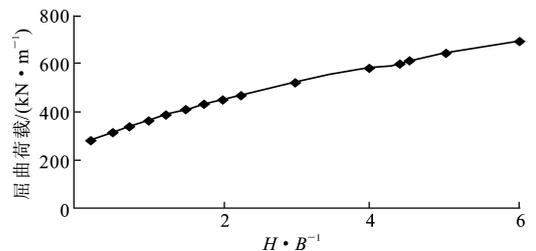


图 9 屈曲荷载随肋板高度变化趋势

Fig. 9 Variation Tendency of Buckling Load vs Rib Height

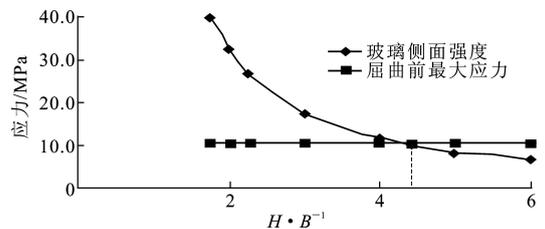


图 10 屈曲前应力随肋板高度变化趋势

Fig. 10 Variation Tendency of Stress vs Rib Height Before Buckling

由图 9、10 中可以看出:随着肋板高度的增加,屈曲荷载逐渐增大,屈曲前最大应力则逐渐减小。当  $H/B < 4.4$  时, T 型组合受弯玻璃构件中的翘曲

前最大应力已经超过玻璃的极限强度,说明在理想状态下,满足这一条件的T型组合受弯玻璃构件不会发生失稳情况。

由图9、10还可以看出:对于T型组合受弯玻璃构件而言,其屈曲荷载受翼缘板宽度影响较为明显,随着翼缘板宽度增加,T型组合受弯玻璃构件的屈曲荷载显著提高,而肋板的高度对结构的屈曲荷载影响相对较小。

## 4 结 语

(1)T型组合受弯玻璃板经常应用于承载玻璃结构中,这种脆性材料构成的承载构件在荷载作用下的力学反映较为复杂,现行玻璃幕墙规范中没有相关的规定。

(2)不考虑失稳的情况下,T型组合受弯玻璃板的承载能力仅与其板厚、翼缘板宽度及肋板高度有关,采用有限元方法对T型组合受弯玻璃板的静力承载能力进行分析,得出了这种T型组合受弯玻璃构件在板厚、翼缘板宽度及肋板高度变化的情况下,其应力及位移变化的趋势。

(3)T型组合受弯玻璃板发生失稳情况时,翼缘玻璃板及玻璃肋板将产生翘曲变形。在T型组合受弯玻璃构件最可能出现的屈曲模态中,翼缘板及肋板均发生1/4波形状的翘曲。

(4)T型组合受弯玻璃板的屈曲荷载随着翼缘板宽度及肋板高度的增加而增大,但翼缘板宽度对屈曲荷载影响相对较大。对理想状态下跨度为1500mm,板厚为10mm的T型组合受弯玻璃构件,当 $H/B < 4.4$ 时,组合受弯玻璃构件不会发生失稳情况,当 $H/B > 4.4$ 时,组合受弯玻璃构件则可能发生失稳情况。

### 参考文献:

### References:

[1] 王元清,张恒秋,石永久.玻璃承重结构的工程应用及其设计分析[J].工业建筑,2005,35(2):6-10.  
WANG Yuan-qing, ZHANG Heng-qiu, SHI Yong-jiu. The Engineering Application and Design Analysis of Load Bearing Glass Structure[J]. Industrial Construction, 2005, 35(2): 6-10.

[2] JGJ 102-2003,玻璃幕墙工程技术规范[S].

JGJ 102-2003, Criterion of Glass Curtain Wall Engineering Technology[S].

[3] CECS 127:2001,点支式玻璃幕墙工程技术规程[S].  
CECS 127:2001, Criterion of Point Supported Glass Curtain Wall Engineering Technology[S].

[4] 刘忠伟,马眷荣.建筑玻璃在现代建筑中的应用[M].北京:中国建材工业出版社,2000.

LIU Zhong-wei, MA Juan-rong. Building Glass Application in Modern Building[M]. Beijing: China Architecture Material Industrial Press, 2000.

[5] 王元清,张恒秋,石永久.玻璃承重结构的设计计算方法分析[J].建筑科学,2005,21(6):26-30.

WANG Yuan-qing, ZHANG Heng-qiu, SHI Yong-jiu. The Analysis of Calculating and Design Method for Load Bearing Glass Structures[J]. Building Science, 2005, 21(6): 26-30.

[6] 陈绍蕃.钢结构设计原理[M].北京:科学出版社,2001.

CHEN Shao-fan. Steel Structure Design Theory[M]. Beijing: Science Press, 2001.

[7] 铁摩辛柯 S,沃诺斯基 S.板壳理论[M].《板壳理论》翻译组,译.北京:科学出版社,1977.

TIMOSHENKO S, WOINOWSKY S. Shell Theory [M]. Translated by Shell Theory Translation Team. Beijing: Science Press, 1977.

[8] ANDREAS L, MICHEL C. Buckling Strength of Glass Elements in Compression[J]. Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering, 2004, 14(5): 120-125.

[9] 龙文志.玻璃结构初论[C]//中国建筑金属结构协会铝门窗幕墙委员会.2003年铝门窗幕墙技术论文集.广州:广州出版社,2003:234-264.

LONG Wen-zhi. Discuss of Glass Structure[C]//CC-MSA Aluminum Doors and Windows Act Wall Committee. Collected Works of Aluminum Doors and Windows Act Wall Technology in 2003. Guangzhou: Guangzhou Press, 2003: 234-264.

[10] 《建筑结构静力计算手册》编写组.建筑结构静力计算手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1975.

Architecture Structure Static Calculation Handbook Compile Team. Architecture Structure Static Calculation Handbook [M]. Beijing: China Architecture & Bulding Press, 1975.