

飞机舷窗有机中空透明件的变形和应力分析

刘立忠, 纪毅璞, 包亦望, 左 岩

(中国建筑材料科学研究总院 绿色建筑材料国家重点实验室, 北京 100024)

摘要: 针对某机型飞机舷窗有机中空透明件的载荷特点, 建立了用于计算中空透明件变形和应力的迭代算法和有限元模型, 并通过试验验证了该算法和有限元模型的准确性。对多种规格有机中空透明件进行了计算, 分析了变形和应力与舱外气压、有机玻璃板厚度、气体层厚度的关系。

关键词: 有机中空透明件; 有限元; 迭代算法; 应力; 变形

中图分类号: V214.4+1; V214.8

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2009)02-0076-05

现代飞机的舷窗通常采用有机中空透明件(或称为双层玻璃)制造。为了适应某机型海上作业环境的要求, 其有机中空透明件采用独立式间隔框结构, 并且在间隔条内注满专用干燥剂(一种高效分子筛吸附剂), 用于吸附水分子, 保持中空透明件内部气体的干燥。由于中空透明件内部存在干燥的气体夹层, 因此能够有效降低结构的传热系数, 同时具有很好的隔声性能。此外, 中空透明件的防结露性能和安全性能也比普通 PMMA 好。一般来说, 中空透明件的抗风压强度是普通单片 PMMA 的 1.5 倍。

飞机在运行过程中, 要反复经历从地面到高空, 再从高空到地面的过程。在这个过程中, 外界气压发生高压-低压-高压的循环变化。当飞机在高空飞行时, 由于外部气压的降低, 会使玻璃板变形, 在玻璃板内引起很大的应力。这种变形和应力的循环变化对中空透明件的使用寿命有严重影响, 因此必须加以深入研究。

当前对中空透明件(建筑上称为中空玻璃)变形和应力的研究成果主要集中在无机中空玻璃领域。在这些研究中, 清华大学的马赢、石永久、王元清等人发表了多篇学术论文^[1~6], 通过对点支式中空玻璃、异形中空玻璃等进行有限差分或有限元分析, 并配合相关的试验, 得出了气体层厚度、玻璃板厚及孔心边距等对于中空玻璃承载性能、变形及应

力的影响。此外, 童丽萍等人^[7,8]运用正交各向异性大挠度板的非线性理论, 探讨了中空玻璃的主刚度和折算刚度的计算, 并分析了中空玻璃在自重、风载荷、地震作用力及温度变化情况下的内力和变形。张克姝等人^[9]研究了青藏铁路客车车窗中空玻璃在内外压差不断循环变化条件下导致的强度降低问题。殷永炜等人^[10]进行了点支式中空玻璃承载性能的试验和有限元分析, 给出了现行规程中空玻璃等效厚度取值的修正系数, 同时给出了最大应力和最大位移的建议计算公式。道康宁公司的 Stewart 等人^[11]建立了中空玻璃边缘密封的热位移和温差变化的有限元计算模型, 计算了温度变化为 $-30\sim +60^{\circ}\text{C}$ 范围内的变形和应力。

上述研究工作对于飞机舷窗用有机中空透明件的变形和应力分析有一定的借鉴意义。但由于有机中空透明件的材料特性及所受载荷的形式与无机中空玻璃不同, 导致其变形和应力也存在很多差异。当前针对飞机舷窗用有机中空透明件力学行为的研究尚不多见。

本文采用有限元分析方法, 建立某机型飞机舷窗用有机中空透明件在压差作用下的计算模型, 并通过试验验证所建模型的准确性。在此基础上, 针对此机型中空透明件进行有限元分析, 考察玻璃板厚度、气体层厚度等因素在不同压差情况下对变形和应力分布的影响, 以便为此机型有机中空透明件的设计提供一些理论参考。

1 某机型飞机舷窗有机中空透明件的载荷特点

用作飞机舷窗的有机中空透明件, 外、内片玻璃

收稿日期: 2008-06-30 修订日期: 2008-10-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(50772103, 50672093, 50872126); 国际科技合作重点项目计划(2005DFA51010)

作者简介: 刘立忠(1971-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事先进材料的力学性能研究, (E-mail) lliu666@yahoo.com.cn

边缘均嵌固于窗框中,并通过密封材料压得很紧,因此可以认为边缘不发生变形,并始终保持固支状态,而有机玻璃板在外界压力变化时产生相应的变形^[9]。

中空透明件的初始状态为两块平行的有机玻璃板中间密封具有一定初始压力的气体。一般密封气体层的初始压强为一个大气压 ($1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$)。针对本文所研究的机型,机舱不是增压舱,机舱内压力和机舱外压力相等。在高空运行时舱内和舱外压力均小于气体层的初始内压,因此两块玻璃板会向舱内和舱外凸起,如图 1 所示。凸起变形后两块玻璃板具有相同的力平衡关系,即:

$$P_{0d}A = P_1A + F \quad (1)$$

式中, A 为玻璃板面积, P_{0d} 为变形后气体层的气体压强, P_1 为舱外气压 (与舱内气压 P_2 相等), F 为玻璃板边部支承力。

对于中空透明件气体层内部的密封气体,在不考虑温度变化的情况下,理想气体的状态方程为:

$$P_0V_0 = P_{0d}V_{0d} = P_{0d}(V_0 + \Delta V) \quad (2)$$

式中 P_0 , V_0 为气体层内初始的气压和体积, P_{0d} , V_{0d} 为变形后气体层内的气压和体积,而 ΔV 为气体层体积的变化量,增大为正值,减小为负值。

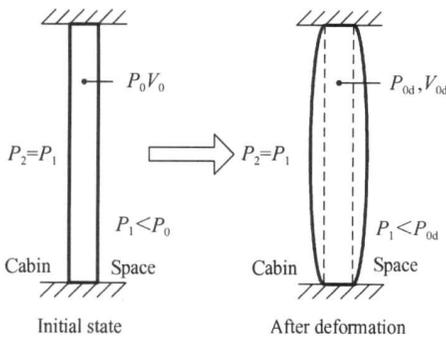


图 1 有机中空透明件承载和变形示意图

Fig 1 Loading condition and deformation behavior of PMMA hollow transparency

另外,在外界压力变化时,随着有机玻璃板的变形,用于中空透明件气体层密封的间隔条和密封胶也会发生一定的变形,但是这种变形很小,引起的应力也很小^[11],因此为突出主要问题和简化计算,本文的研究中将不考虑这种变形。

2 有限元模型

求解中空透明件的变形问题,就是根据已知条件 (中空透明件的几何参数、舱外和舱内气压载荷、

变形达到平衡时中空透明件气体层的气压载荷、有机玻璃板的材料参数),采用有限元分析的方法求解力平衡方程,从而得出玻璃板的变形和应力分布。但从上面的分析可知,中空透明件气体层内的气压随着玻璃板的变形不断变化,最终达到平衡状态。要确定平衡状态时气体层的气压,就必须知道玻璃板的变形量,而玻璃板的变形是待求量。由于已知条件不足,因此无法直接进行求解,而必须进行迭代计算。

具体的迭代流程如图 2 所示。首先设定舱外气压 P_1 , 中空透明件气体层初始气压 P_0 。然后假设变形平衡时气体层的气压为 P_{0d} , 并设定 P_{0d} 的取值范围 P_{max} , P_{min} 。根据其它已知条件及假设的 P_{0d} , 即可建立有限元计算模型,并计算当前条件下的玻璃板变形。由计算出的玻璃板变形量可以得出气体层的体积变化量,然后根据气体的状态方程 (式 2) 求得当前气体层体积下的气压 P_g 。比较 P_{0d} 和 P_g , 如果相等,说明假设的气压即为真实平衡时的气压,结束计算,否则调整 P_{0d} , 并重新进行有限元计算,直到二者相等。

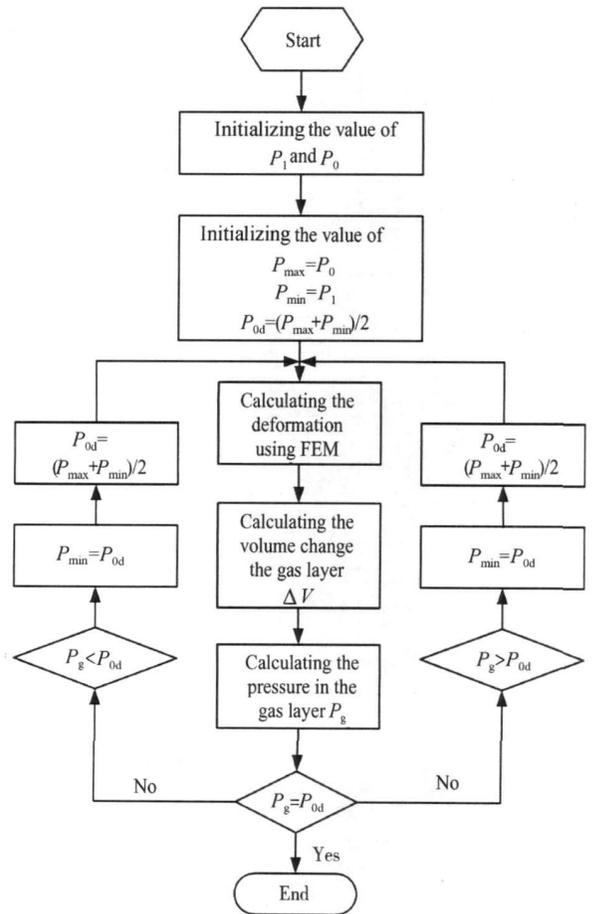


图 2 计算有机中空透明件变形的迭代流程

Fig 2 Flow chart for calculating the deformation of PMMA hollow transparency

迭代计算过程中所需的有限元计算模型如图 3 所示。根据几何形状及载荷对称性,选取中空透明件的八分之一建立有限元模型。另外根据文献 [11]的研究结果,由于中空透明件间隔条和密封胶的变形很小,且又受到窗框的约束,为简化计算,可以不考虑它们的变形,只对玻璃板建立有限元模型。图 3 中玻璃板的两个边缘施加固支边界条件^[9],对称边施加对称约束。由于 ANSYS 中带中间节点的 SHELL93 壳单元能够更精确地模拟变形后的曲面形状,因此此处选用 SHELL93 壳单元对玻璃板划分网格。单元的边长为 5mm,经过验证计算,表明所采用的单元尺度是合适的。对于尺寸为 510mm × 360mm 的中空透明件,其八分之一部分为单块玻璃板的四分之一部分,即 255mm × 180mm。由于中空透明件边部存在宽度约为 10mm 的密封胶部分,为完全固支状态,因此在划分单元时可将此区域忽略,而只对中间的 245mm × 170mm 区域划分单元,固支条件直接施加在边缘节点上即可。整个模型共划分 1666 个单元。气压载荷分别施加于壳单元的两侧。

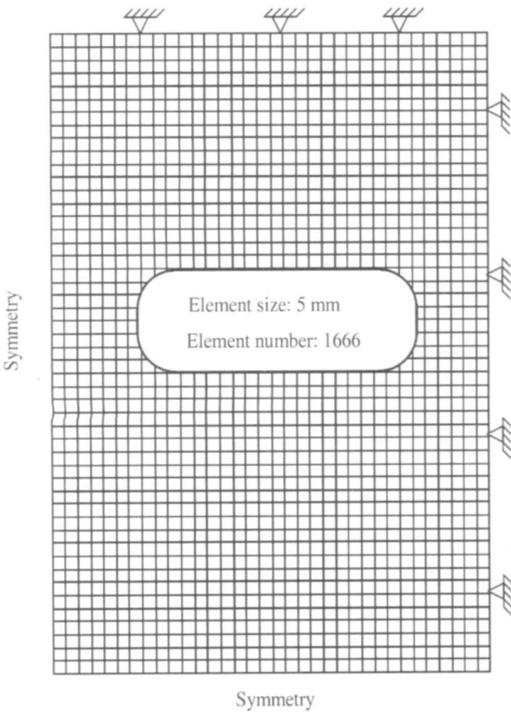


图 3 有限元模型及边界条件

Fig 3 Finite element model and boundary conditions

有机玻璃的本构关系采用线弹性模型进行模拟,弹性模量为 2.84 GPa,泊松比为 0.35,拉伸强度为 76.5 MPa。

在得到玻璃板的变形量后,采用 ANSYS 的后处理功能,提取每个单元的变形量及单元面积,二者的

乘积即为气体层的体积变化量 ΔV ,然后即可根据式 (2)计算当前体积下气体层的气压,进而进行后续迭代运算。

为了验证计算模型的准确性,对尺寸为 510mm × 360mm,规格为 3mm PMMA + 6mm 间隔框 + 3mm PMMA 的中空透明件进行试验。试验方法按中空玻璃国家标准^[12]中的密封试验方法进行。将中空透明件放入真空箱内,降低真空箱的气压,测量相应气压下中空透明件的最大变形量。将试验值和计算值进行比较,如图 4 所示。从图中可以看出二者基本吻合,表明所采用的计算方法基本正确。

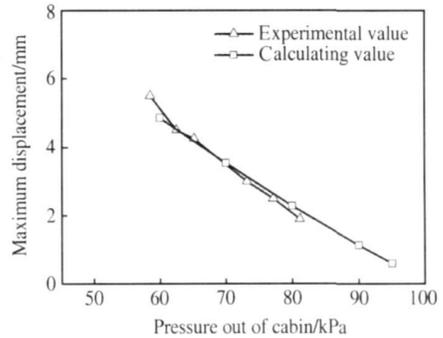


图 4 中空透明件最大位移的试验值和计算值比较

Fig 4 Comparison of maximum displacement obtained from experiments and FEM calculation

3 中空透明件的变形和应力分析

采用前述的迭代算法和有限元模型,对尺寸为 510mm × 360mm 的多种规格有机中空透明件在不同舱外压力下的变形和应力进行分析。分析结果表明,玻璃板的最大横向位移发生于对称中心,而最大拉应力位于长边的中点。舱外气压、玻璃板厚度和气体层厚度对变形和应力都有影响,下面对这些影响因素分别进行讨论。

3.1 舱外压力的影响

对尺寸为 510mm × 360mm,规格分别为 2(3 4.5)mm PMMA + 6mm 间隔框 + 2(3 4.5)mm PMMA 的中空透明件进行计算。舱外气压分别为 50kPa 60kPa 70kPa 80kPa 95kPa,计算得出的最大位移和最大拉应力如图 5 所示。从图 5a 可以看出,对于不同规格的中空透明件,有机玻璃板的最大位移随着舱外压力的降低而线性增大,而玻璃板的厚度对变形影响不大。如果给定一个玻璃板厚,计算具有不同气体层厚度的中空透明件在不同舱外压力下的变形,可以发现此时玻璃板的最大位移与舱外压力的关系也是线性的。图 5b 表明,玻璃板的最大拉应

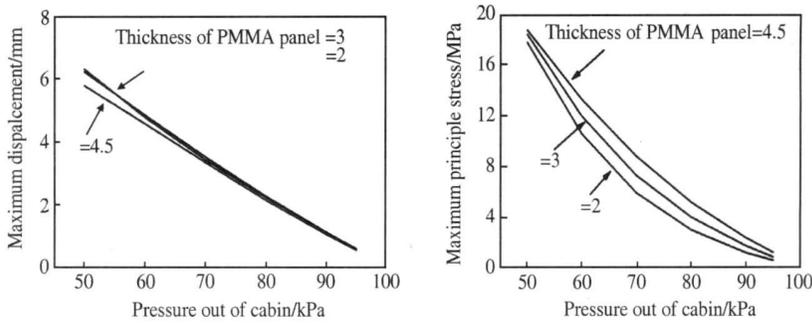


图 5 不同舱外压力下玻璃板的最大位移 (a)和最大拉应力 (b)

Fig 5 Relation of pressure out of cabin and maximum displacement (a) or maximum principle stress (b) in PMMA panel

力随着舱外压力的降低而增大,且不再是线性关系,可以用二次曲线来描述,同时最大拉应力随板厚的增大也相应增大。

3.2 有机玻璃板厚度的影响

为研究玻璃板厚度对位移和应力的影响,在舱外压力为 70kPa 时,对尺寸为 510mm × 360mm,规格为 2(2.5 3 3.5 4 4.5)mm PMMA + 4(6 9)mm

间隔框 + 2(2.5 3 3.5 4 4.5) mm PMMA 的中空透明件进行了计算,如图 6 所示。其中图 6a 表明,玻璃板厚度对最大位移的影响很小,随着玻璃板厚度的增大最大位移只是稍有减小,而气体层厚度对最大位移的影响较大。图 6b 表明,随着玻璃板厚度的增大,最大拉应力增大,这是因为玻璃板越厚,变形约束越大,导致应力越大。

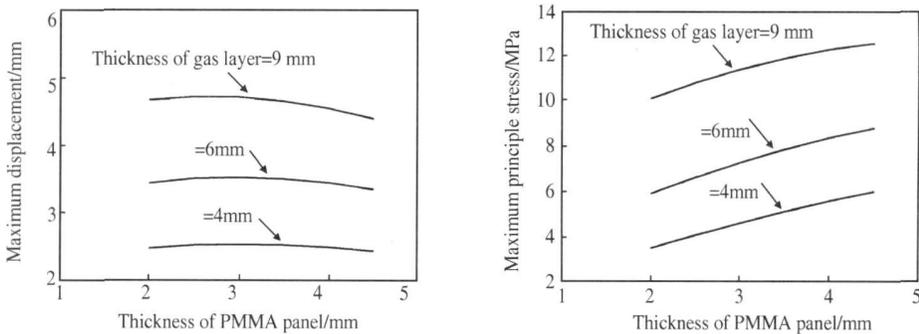


图 6 舱外压力为 70 kPa 时,玻璃板厚度与最大位移 (a)和最大拉应力 (b)的关系

Fig 6 Relation of PMMA panel's thickness and maximum displacement (a) or maximum principle stress (b) under the pressure 70 kPa out of cabin

3.3 气体层厚度的影响

在舱外压力为 70kPa 时,对尺寸为 510mm × 360mm,规格为 2(3 4.5)mm PMMA + 4(5 6 7 8 9)mm 间隔框 + 2(3 4.5) mm PMMA 的中空透明件进行计算,以研究气体层厚度的影响,计算结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出,气体层厚度越大,玻璃板的最大位移越大,而最大应力也越大。这是因为平衡时气体层内气压只能稍大于舱外压力,而气体层厚度越大,根据气体状态方程,达到这种平衡状态所需的气体层体积变化越大,因此所需的玻璃板变形越大,导致玻璃板内的应力也越大。

(2) 气体层厚度越大,有机玻璃板的最大位移

4 结论

本文利用迭代算法和有限元模型分析飞机舷窗有机中空透明件的变形和应力,通过对计算结果的分析,可以得出以下结论:

(1) 所采用的迭代算法及有限元计算模型基本正确,有机玻璃板的最大位移随着舱外压力的降低而线性增大,最大拉应力随着舱外压力的降低而增大,但不再是线性关系。有机中空透明件的最大位移位于对称中心,而最大拉应力位于长边中点。越大,最大拉应力也越大;有机玻璃板厚度对最大位

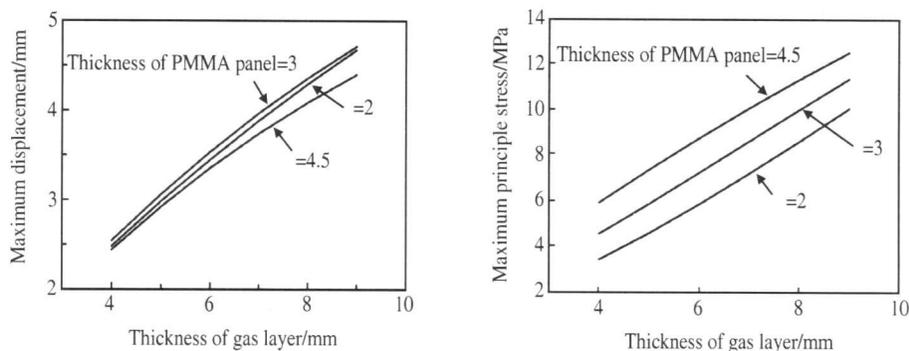


图 7 舱外压力为 70 kPa 时, 气体层厚度与最大位移 (a) 和最大拉应力 (b) 的关系

Fig 7 Relation of gas layer's thickness and maximum displacement (a) or maximum principle stress (b) under the pressure 70 kPa out of cabin

移的影响很小, 随着玻璃板厚度的增大最大位移只是稍有减小, 另外随着玻璃板厚度的增大, 最大拉应力增大。

参考文献:

- [1] 马赢, 石永久, 王元清. 点支式中空玻璃板承载性能的有限差分法分析 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2006, 46(3): 305-308
- [2] 马赢, 石永久, 王元清. 点支式中空玻璃承载性能的有限元分析 [J]. 应用力学学报, 2006, 23(1): 115-119
- [3] 石永久, 马赢, 王元清. 点支式双层中空玻璃板的变形性能分析 [J]. 工业建筑, 2005, 35(2): 20-22
- [4] 马赢, 王元清, 石永久, 等. 四点支承异形中空玻璃板抗弯性能的有限元分析 [J]. 南京工业大学学报, 2005, 27(5): 42-45
- [5] 马赢, 王元清, 石永久, 等. 三点支承中空玻璃抗弯性能试验与数值分析 [J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(2): 30-33
- [6] 马赢, 石永久, 王元清. 点支承中空玻璃板孔边应力的有限元分析 [J]. 建筑科学, 2005, 21(4): 42-45
- [7] 童丽萍, 王广国. 高层建筑中空玻璃幕墙的结构分析 [J]. 应用力学学报, 2001, 18(2): 134-137
- [8] 童丽萍, 罗英. 中空玻璃幕墙结构的非线性问题研究 [J]. 工业建筑, 2001, 31(10): 16-18
- [9] 张克姝, 程建峰. 青藏客用车窗玻璃低压问题研究 [J]. 铁道车辆, 2008, 46(2): 4-7, 41
- [10] 殷永炜, 张其林, 王丹, 等. 点支式幕墙中空玻璃承载性能的理论 and 试验研究 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2005, 33(11): 1433-1437
- [11] STEWART JE, BRENWRO, WOLFA T. 采用有限元分析法量化不同中空玻璃边缘密封的热位移 [J]. 李宏伟, 周文亮, 王文开, 等译. 玻璃, 2007, (2): 53-57
- [12] GB/T 11944-2002 中空玻璃, 2002

Analysis of Deformation and Stress of PMMA Hollow Transparency Used in Porthole

LU L+zhong JIY+pu BAO Y+wang ZUO Y an

(State Key Laboratory of Green Building Materials, China Building Materials Academy, Beijing 100024, China)

Abstract The iterative algorithm and finite element model were built to investigate the deformation and stress of PMMA hollow transparency used in porthole according to the specific loading characteristics. The deformation obtained from proof tests and calculations were consistent with each other, which implied the accuracy of the algorithm and finite element model. Then the calculations were performed to deal with different pressure out of cabin, different thickness of PMMA panel and different thickness of gas layer. The relations of deformation (or stress) and pressure out of cabin, thickness of PMMA panel, thickness of gas layer were obtained and analyzed.

Key words PMMA hollow transparency; finite element; iterative algorithm; stress; deformation