

强风环境下穿孔铝板幕墙抗风性能研究

杨江涛¹, 吴耀祖¹, 王秀丽², 闫飞宇²

(1. 中铁二十一局集团第二工程有限公司, 甘肃 兰州 730030;

2. 兰州理工大学 土木与水利工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:穿孔铝板是一种新型外装饰材料,为保证其在强风环境下的正常使用,开展穿孔铝板抗风性能研究十分必要。本文以工程常用穿孔铝板为对象,采用试验验证和有限元数值模拟相结合的方法,系统研究不同穿孔间距、穿孔直径及穿孔率对穿孔板变形特性、应力分布及整体抗风性能的影响规律。结果表明:在穿孔间距不变的条件下,当穿孔率固定时,穿孔直径增大会导致穿孔铝板的变形和应力水平呈小幅上升趋势;随着穿孔率的增加,穿孔铝板的变形和应力均呈现“先减小后增大”的趋势。本文研究成果可为实际工程的穿孔铝板选材、抗风设计及应用提供技术支撑。

关键词:穿孔铝板幕墙; 穿孔间距; 穿孔直径; 穿孔率; 抗风性能; 有限元分析

中图分类号: TU973⁺.23

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2026)02-0010-07

doi: 10.13402/j.gejs.2026.02.013

Study on wind resistance performance of perforated aluminum panel curtain walls in strong wind environment

YANG Jiangtao¹, WU Yaozu¹, WANG Xiuli², YAN Feiyu²

(1. China Railway 21st Bureau Group Second Engineering Co., Ltd., Lanzhou 730030, Gansu, China;

2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: Perforated aluminum panel is a new type of exterior decorative material. In order to ensure its normal use in strong wind environment, it is essential to study its wind resistance performance. In this paper, by means of the method in combination of experimental verification and finite element numerical simulation, the perforated aluminum panels commonly used in engineering are systematically studied for the influence of different perforation spacings, perforation diameters, and perforation rate on the deformation characteristics, stress distribution, and overall wind resistance performance of the perforated panels. The results show that, under constant perforation spacing and a fixed perforation rate, an increase in perforation diameter leads to a slight upward trend in the deformation and stress levels of the perforated aluminum panel. As the perforation rate increases, both the deformation and stress of the perforated aluminum panel show a trend of “initially decreasing and then increasing”. The findings of this paper can provide technical support for the material selection, wind-resistant design, and application of perforated aluminum panels in practical engineering projects.

Key words: perforated aluminum panel curtain wall; perforation spacing; perforation diameter; perforation rate; wind resistance performance; finite element analysis

随着建筑装饰工程以及施工技术的快速发展, 各种新型幕墙广泛应用于各类建筑。常见的开放

收稿日期: 2025-10-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52368001); 甘肃省住建厅科技攻关项目(JK2022-08)

作者简介: 杨江涛(1991—)男, 工程师, 从事土木工程方面的施工与管理工作。

通信作者: 王秀丽(1963—)女, 教授, 博士, 博导, 从事空间结构方面教学、设计与研究工作。

式建筑幕墙有穿孔铝板幕墙,将单层矩形铝板的对边按相同尺寸弯折,加工成具有矩形截面的边框,并在长边一侧的板面开孔,得到穿孔铝板。穿孔铝板幕墙具有良好的采光、通风和遮阳等特性,具有重量轻、强度高、耐腐蚀性好、绿色环保等优点,因此被广泛应用于酒店、办公楼、机场等公共建筑。双层穿孔铝板幕墙具有以下优点:1)能良好地实现采光、通风和遮阳功能,可直接或间接改善建筑热工性能;2)双层穿孔铝板的重量轻且强度较高;3)双层穿孔铝板具有较好的耐腐蚀性和可塑性;4)双层穿孔铝板的材料本身绿色安全,可回收再生利用,十分环保节能;5)双层穿孔铝板具有良好的抗弯刚度和抗风压性能。穿孔铝板幕墙承受的最不利荷载工况为风荷载,规范中虽给出了非穿孔金属板风荷载标准值的计算方法,但未明确适用于穿孔铝板的规定。为了精确分析穿孔铝板幕墙的实际受力,保证工程质量,研究穿孔铝板的抗风性能具有重要的工程意义。

国内外学者对穿孔铝板开展了相关研究。罗正午^[1]通过分析建立了均匀开孔与未开孔铝板之间的对应关系,进而依据未开孔铝板的结果推算出均匀开孔铝板的结果。马振国等^[2]基于有限元建模分析,阐明了穿孔铝板的穿孔形状、穿孔率、板厚、尺寸规格、风压大小等因素对其变形和应力的影响规律。郭小农等^[3]通过对开孔铝板开展受剪性能足尺试验,发现开孔铝板的受剪承载力随板件宽厚比、长宽比及开孔率的增加均呈降低趋势。LETCFORD 等^[4]提出了不同纵横比、间隙比和孔隙率下矩形招牌或围板的风荷载阻力系数,并指出当面板位于边界层中时,其法向力系数存在显著差异。王超等^[5]通过风洞试验,获得了穿孔率等因素对穿孔板、前面板和背衬板所受风荷载大小的影响规律。HUI 等^[6]研究了加强筋对铝板幕墙单元抗风性能的影响,经有限元分析发现加强筋与铝板协同作用良好;设计合理的加强筋可提高幕墙抗风性能、减小表面变形、优化应力分布,且当铝板与加强筋紧密连接时,整体抗风性能进一步提升。CHEN 等^[7]对高层建筑幕墙抗风性能的分析结果表明,邻近高层建筑对幕墙位移影响显著,高层建筑侧向高度越小,其变

形对幕墙产生的附加响应越大。本文结合实际工程采用的外立面铝板幕墙材料,针对不同穿孔率(含不同孔径)对穿孔铝板的影响进行数值模拟分析,进一步研究强风环境下不同穿孔间距和穿孔直径对穿孔铝板应力及位移的影响,以期在实际工程中穿孔铝板的选材与应用提供技术支撑。

1 有限元模型建立

1.1 模型建立和单元选取

基于实际工程中的选材及构造方式,采用有限元软件建立计算模型。为还原实际工程情况,计算模型包含穿孔铝板、折边、加强筋及角码。铝合金材料选用 6063-T1,铝板厚度为 3 mm,面板尺寸为 1 417 mm × 2 322 mm,穿孔率为 10%。在此基础上,分别建立不同穿孔间距的有限元计算模型。穿孔板背面布置有 5 根加强筋,加强筋间距为 340 mm,并在长边布置 9 个角码,短边布置 5 个角码,参照《金属与石材幕墙工程技术规范》(JGJ 133—2001),角码折边高度取 30 mm。其中,穿孔铝板、折边、角码等薄壁结构采用壳单元(Shell),加强筋采用实体单元(Solid),如图 1 所示。

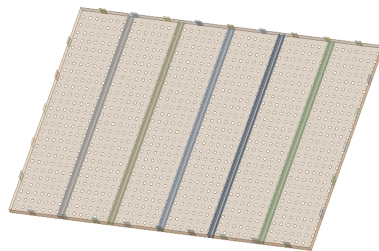


图 1 穿孔铝板有限元模型

1.2 材料本构关系

幕墙板面和加强筋均采用 6063-T1 系列铝合金,角码采用 Q235 钢材。其中 Q235 钢材的力学参数如表 1 所示。

表 1 材料力学参数

材料	容重/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模 量/GPa	伸长率/ MPa	泊松比
Q235	7800	201	235	0.3

铝合金 6063-T1 材料的本构参数通过试验获得,试件尺寸根据《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1)设计为 3 个 3 mm 厚的标准拉伸试件,如图 2 所示,试件原始标距为 45 mm。

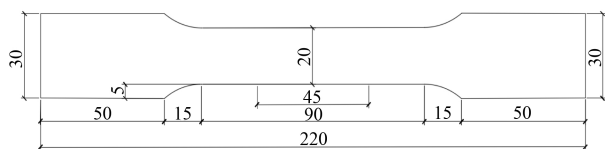


图 2 铝合金拉伸试件标准 mm

打磨试件中心部位,在两侧贴横向与竖向应变片;贴好后置于万能试验机,将应变片与静态应变仪相连以测量应变,在试件标距段两侧布置量程为 50 mm 的电子引伸计,随后进行加载,如图 3 所示。

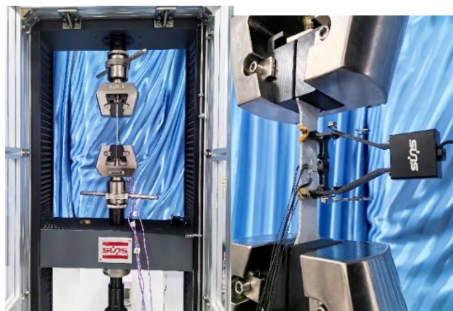


图 3 试验设备示意

试件在拉伸过程中均未出现明显收缩现象;拉伸断裂时伴有较大响声,断裂边缘局部有发热现象,断面与试件横截面约呈 30° 夹角,试件断裂如图 4 所示。由试验所得名义应力-应变曲线如图 5 所示。

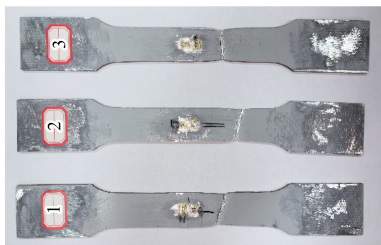
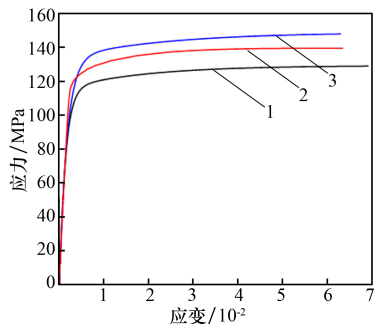


图 4 试件拉伸断裂照片



1—试件 1; 2—试件 2; 3—试件 3。

图 5 拉伸试件应力-应变曲线

由图 5 可知:曲线无明显屈服平台,以残余

应变达到 0.2% 对应的应力值作为材料名义屈服应力;对 3 个试件各力学参数取平均值用于数值模拟,如表 2 所示。

表 2 拉伸试件力学参数

试件编号	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	泊松比
1	67.453	110.673	128.798	0.342
2	66.953	123.661	139.555	0.328
3	78.376	124.894	147.148	0.387

1.3 参数设置

采用 Mapped 方法对结构做网格划分,开启大挠曲变形计算;将角码与折边、加强筋与板面的接触面均设置为绑定连接,将角码与折边连接的上端面设为固定约束,并将风荷载均布垂直作用于板面(正压)。

2 穿孔铝板变形和应力的影响分析

2.1 横向穿孔间距的影响

保持穿孔率为 10%,竖向穿孔间距 b 为 33 mm 不变,横向间距 a 分别为 33、28、23、18、13 mm,如图 6 所示。

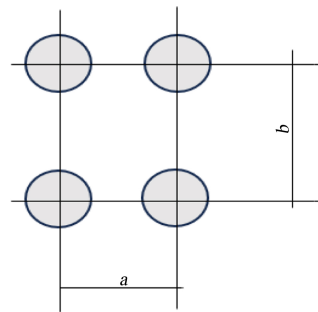
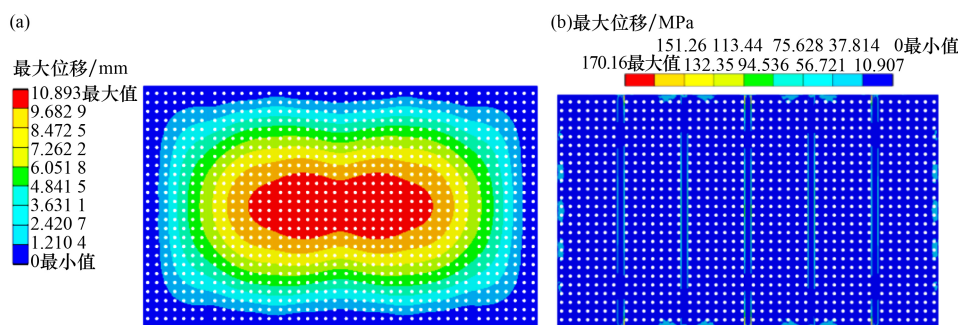


图 6 穿孔间距示意 mm

对板面施加 1 kPa 的均布风压,模拟分析后横向穿孔间距为 33 mm 的穿孔铝板变形和应力云图如图 7 所示。由图 7 可知:穿孔铝板的变形较大区域分布在板面中心,呈椭圆状;穿孔铝板的应力较大区域分布在长边一侧的角码与折边连接处,其中中间位置的角码区域应力最大。

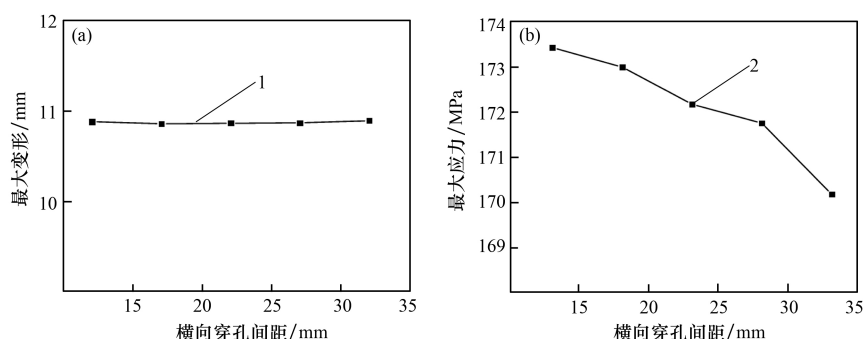
将模拟分析结果中结构的最大变形、最大应力和横向穿孔间距的关系绘制成折线图如图 8 所示。由图 8 可知:当竖向穿孔间距不变时,随着横向穿孔间距的不断增大,板面的最大变形变化幅度非常小,结构的最大应力呈小幅减小趋势。



(a) 变形云图; (b) 应力云图

图 7 穿孔铝板变形和应力云图

mm



(a) 最大变形; (b) 最大应力

1—板面最大变形; 2—结构最大应力。

图 8 不同横向穿孔间距变形和应力的影响

mm

总体来看,当穿孔率和竖向穿孔间距不变时,横向穿孔间距的变化对结构的变形和应力影响不大。

2.2 竖向穿孔间距的影响

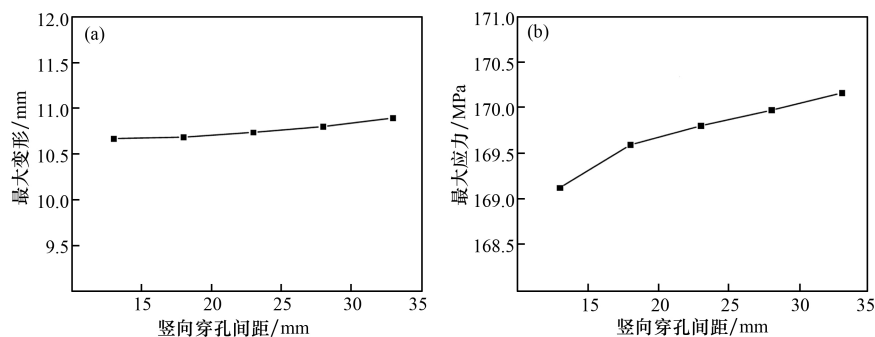
保持横向穿孔间距为 33 mm 不变,竖向间距分别为 33、28、23、18、13 mm,同样对板面施加 1 kPa 的均布风压。将模拟分析结果中结构的最大变形、最大应力和竖向穿孔间距的关系绘制成折线图如图 9 所示。由图 9 可知:当横向穿孔间距不变时,随着竖向穿孔间距的不断增大,板面的最大变形呈小幅增大趋势,结构的最大应力也

呈小幅增大趋势。总体来看,当穿孔率和横向穿孔间距不变时,竖向穿孔间距的变化对结构的变形和应力影响不大。因此,当穿孔率不变时,穿孔间距的改变对穿孔铝板的变形和应力影响不大。

2.3 不同穿孔直径的影响分析

保持穿孔铝板的穿孔率为 13%,穿孔直径分别为 10、30、40、50 mm 建模,边界条件以及荷载等参数设置不变,如图 10 所示。

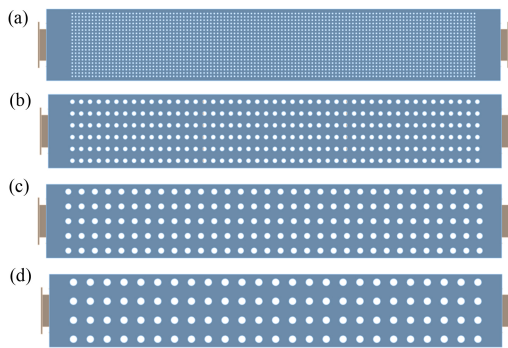
单元的选取、材料力学参数与约束条件等均保持不变。在施加风荷载时,以 70 m 高度为基准



(a) 板面最大变形; (b) 结构最大应力

图 9 不同竖向穿孔间距对穿孔铝板最大变形和应力的影响

mm



孔径/mm: (a) 10; (b) 30; (c) 40; (d) 50

图 10 不同开孔直径整体模型示意

调整风荷载, 对不同开孔直径的双层穿孔铝板施加等效调整后的风荷载。考虑到迎风面与背风面在不同开孔直径下受风压差异, 以穿孔率为 13% 时的计算结果为基准, 采用拟合公式(1)、(2), 将迎风板与背风板不同开孔直径 d 下的平均风压与基准结果对比, 得到影响系数 $\lambda_{\alpha_{\text{迎}}}$ 及 $\lambda_{\alpha_{\text{背}}}$, 再换算成相应的基本风压值 $\omega_{\text{迎}}$ 及 $\omega_{\text{背}}$, 最终得到迎风板与背风板调整后的风荷载值, 如表 3 所示。

$$\lambda_{\alpha_{\text{迎}}} = 0.88 + 0.11d \quad (1)$$

$$\lambda_{\alpha_{\text{背}}} = 1.21 + 0.19d \quad (2)$$

表 3 不同开孔直径下迎风板与背风板风荷载的调整值

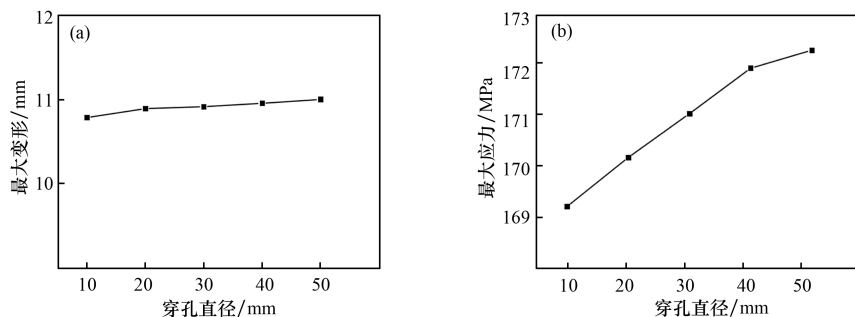
开孔直径/mm	$\lambda_{\alpha_{\text{迎}}}$	$\omega_{\text{迎}} / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	$\lambda_{\alpha_{\text{背}}}$	$\omega_{\text{背}} / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$
10	0.935	1.067	1.115	0.873
30	1.045	1.192	0.925	0.724
40	1.100	1.255	0.830	0.650
50	1.155	1.318	0.735	0.576

通过模拟计算得到不同穿孔直径对穿孔铝板最大变形和最大应力的影响趋势如图 11 所示。由图 11 可知: 在穿孔率不变的情况下, 随着穿孔直径的增加, 穿孔铝板的变形变化不明显, 但应力呈小幅增大趋势, 主要原因是开孔导致截面削弱。

2.4 不同穿孔率的影响

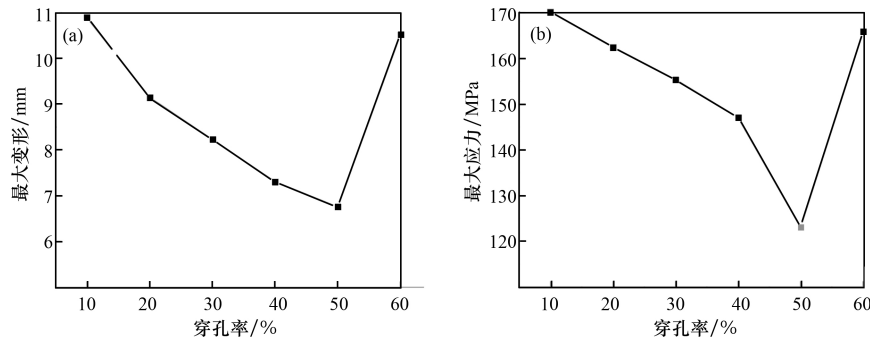
由上文可知, 穿孔直径和间距对穿孔铝板的变形和应力影响较小, 因此在进行穿孔率的模拟分析时可忽略这些因素的影响。

对穿孔铝板按 10%、20%、30%、40%、50%、60% 的开孔率进行开孔建模, 边界条件和荷载等参数设置不变, 通过模拟计算得到不同穿孔率对穿孔铝板变形和应力的影响趋势如图 12 所示。



(a) 板面最大变形; (b) 结构最大应力

图 11 不同穿孔直径对穿孔铝板最大变形和应力影响



(a) 板面最大变形; (b) 结构最大应力

图 12 不同穿孔率对穿孔铝板最大变形和应力的影响

由图 12 可知：随着穿孔率的增加，穿孔铝板板面的变形逐渐减小，表明开孔可减小受风面积，因此适当开孔有助于降低铝板所受风压；变形在穿孔率为 50% 时达到最低，之后则急剧增大。穿孔铝板结构的应力逐渐减小，在穿孔率为 40% 时出现明显减小，50% 时达到最低，但超过 50% 后急剧增大，这可能是由于开孔率过高导致风压分布不均并产生附加应力。因此，在对穿孔铝板的设计中，建议应将穿孔率控制在 50% 以下。

3 铝板变形的加强应对措施

随着建筑高度不断增加，铝板幕墙的使用高度也随之提高。层高较高时，双层穿孔铝板的高度及板面受风面积相应增大，导致承受的风荷载显著提升，因此提升双层穿孔铝板的适用高度具有重要工程意义。为有效提升双层穿孔铝板在风荷载作用下的抗变形能力，通过设计新连接方式减小连接区域附近应力，进而提高其适用高度。其中一种方法是增加铝板折边的螺栓连接（图 13），该方法简单实用。

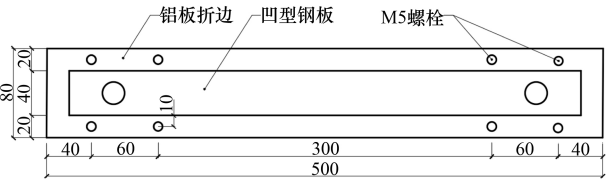
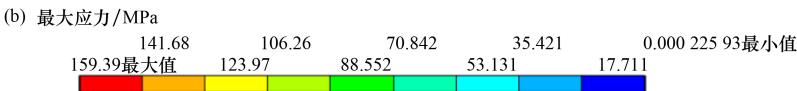


图 13 增加铝板折边螺栓连接示意



(a) 铝板折边；(b) 连接件；(c) 螺栓

图 14 不同构件的应力云图

对增加螺栓连接后的双层穿孔铝板，继续施加高度为 70 m 以上调整后的风荷载标准值，通过模拟分析确定其适用高度范围，相关结果如表 4 所示。由表 4 可知：采用该方式后，双层穿孔铝板的适用高度提升至 110 m。

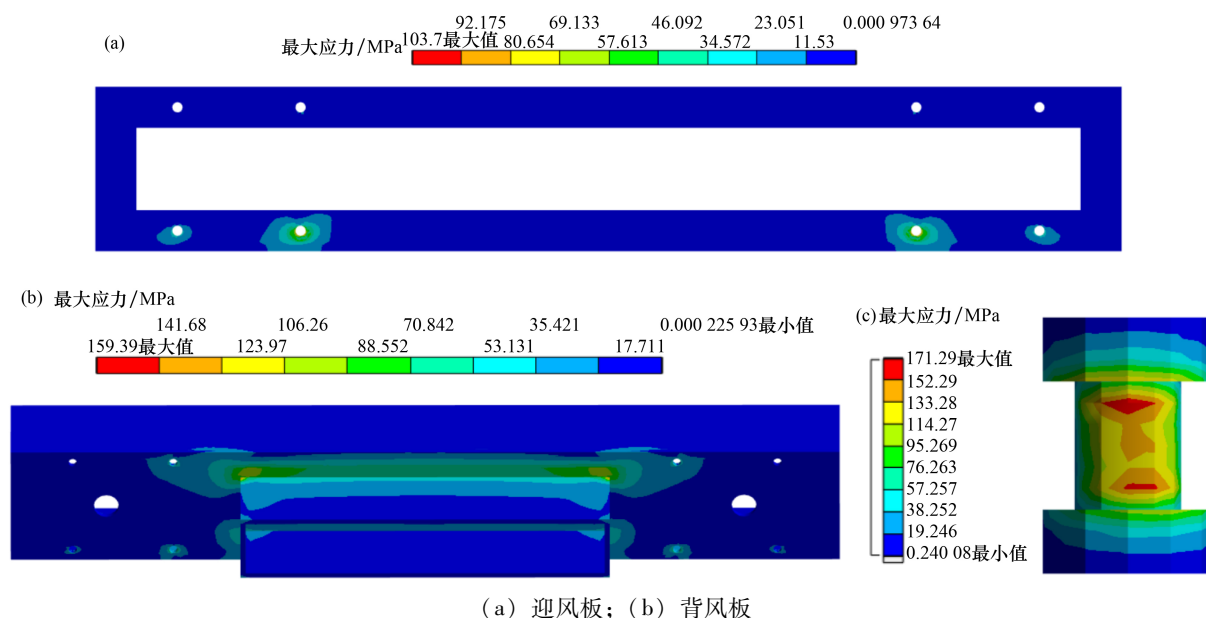
表 4 高度 70 m 以上结构的最大应力与变形汇总

高度/m	整体结构最大应力/MPa	穿孔铝板最大应力/MPa	最大变形/mm
80	178.65	107.68	4.550
90	185.56	112.06	4.706
100	190.75	115.56	4.925
110	194.99	118.13	5.047
120	201.67	122.39	5.184

采用增加螺栓连接后不同构件的应力云图如图 14 所示，穿孔铝板与整体结构的变形如图 15 所示。由图 14、15 可知：各构件应力均满足规范要求，变形分布更趋均匀，表明该加强措施有效，在相同承载力条件下，可提高双层穿孔铝板的适用高度。

4 结 论

- (1) 当穿孔率和穿孔直径保持不变时，穿孔间距的改变对穿孔铝板的变形和应力影响较小。
- (2) 在穿孔率保持不变的情况下，穿孔直径增加虽使穿孔铝板变形变化较小，刚度主要由板



(a) 迎风板; (b) 背风板

图 15 穿孔铝板变形云图

厚和支撑边界控制,但其应力呈小幅增大趋势,因此建议应用中合理控制板面开孔直径。

(3) 随着穿孔率增加,穿孔铝板的变形和应力均呈先减小后增大的趋势,且在穿孔率为 50% 时均达到最低值,建议设计中将穿孔率控制在 50% 以内。

(4) 采用端部增加螺栓连接的方式,可使穿孔铝板变形分布更均匀,这表明在高层建筑中采用此类加强措施能提高双层穿孔铝板的适用高度。

参考文献:

- [1] 罗正午. 均匀穿孔铝板在均布荷载作用下的简单计算探究[J]. 科技创新与应用, 2017, 7(2): 65.
- [2] 马振国, 黄冬, 姚琼, 等. 基于 Ansys 的穿孔铝板有限元分析[J]. 建筑施工, 2021, 43(4): 715 - 717.
- [3] 郭小农, 计丽艳, 刘俊, 等. 开孔铝合金板受剪性能研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(8): 185 - 195.
- [4] LETCHFORD C W. Wind loads on rectangular signboards and hoardings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(2): 135 - 151.
- [5] 王超, 刘军进, 乔彬, 等. 幕墙穿孔金属面板及其背衬板的风荷载调整系数和计算方法研究[J]. 工程力学, 2023, 40(10): 141 - 153.
- [6] HUI C, WANG S Y, LIU M L, et al. Study on the influence of stiffeners on the wind resistance performance of aluminum panel curtain wall[J]. International Journal of Steel Structures, 2022, 22(4): 1189 - 1199.
- [7] CHEN B, JIANG L F, ZHANG L, et al. Wind resistance performance of large-scale glass curtain walls supported by a high-rise building[J]. Buildings, 2023, 13(3): 636.