

引用格式: 韩文兵, 陈景镇, 杨波, 等. 直立锁边金属屋面风洞试验研究及抗风加固措施[J]. 工业建筑, 2026, 56(4): 51-62. HAN Wenbing, CHEN Jingzhen, YANG Bo, et al. Research on Wind Tunnel Test and Strengthening Measures of Standing Seam Metal Roofs[J]. Industrial Construction, 2026, 56(4): 51-62 (in Chinese). DOI: 10. 3724/j. gyjzG23121816

直立锁边金属屋面风洞试验研究及抗风加固措施

韩文兵¹ 陈景镇² 杨波¹ 吕凯芳² 刘华长²

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 中国建筑第四工程局有限公司, 福建厦门 361000)

摘 要 金属屋面作为一种重要的建筑结构, 因其造型美观, 轻质高强等独特优势, 已被广泛应用于各种大型公共场馆中。然而, 当前针对金属屋面抗风性能的研究还存在一定不足, 国内外金属屋面风揭破坏现象时有发生, 对人们的生命财产安全产生严重威胁。基于此, 以厦门国际博览中心金属屋面工程为背景, 采用风洞试验研究了大型金属屋面在风荷载作用下的抗风性能。通过搭建风洞试验平台, 模拟不同风速和风向角下金属屋面的受力状态, 测量和分析其受力特点、等效风荷载和风振系数等分布规律, 得出了围护结构风荷载标准值, 并对常见的两种计算方法进行了对比分析, 得到在围护结构的风荷载标准值计算中采用两种方法的包络结果较为安全。采用 ANSYS 有限元软件建立了陆侧展厅的金属屋面模型, 并进行风振计算, 通过分析位移时程、典型节点等效风荷载等, 得出了可用于本工程设计的整体风荷载值。总结了金属屋面在强风环境下的受力特点和失稳形态, 并分析了影响金属屋面抗风性能的因素。提出了金属屋面抗风设计的加固措施, 包括增强抗风连接和锁边高度, 合理选用材料和构造形式等, 以期为今后该类结构的设计提供理论指导和科学依据。

关键词 大跨金属屋面; 风洞试验; 数值计算; 抗风承载力; 加固措施

Research on Wind Tunnel Test and Strengthening Measures of Standing Seam Metal Roofs

HAN Wenbing¹ CHEN Jingzhen² YANG Bo¹ LYU Kaifang² LIU Huachang²

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. China Construction Fourth Engineering Division Co., Ltd., Xiamen 361000, China)

Abstract: As a common building structure, metal roofs have been widely used in various large public buildings because of their unique advantages such as beautiful shape, light weight and high strength. However, there are still some limitations in the current research on the wind resistance of metal roofing. Therefore, this paper studies the wind resistance of large metal roofing under wind load based on wind tunnel tests on the background of the metal roofing project of Xiamen New International Expo Center. Through the wind tunnel testing, the stress state of the metal roofing under different wind speeds and wind angles was simulated. The distribution of force characteristics, equivalent wind load, and wind vibration coefficient were measured. The standard value of wind load of the envelope structure was obtained, and the two common calculation methods were compared. The envelope results of the two methods are safe in the calculation of the standard wind load of the envelope structure. Finally, the ANSYS finite element software was used to establish the metal roof model of the landside exhibition hall, and the wind vibration calculation was carried out. By analyzing the displacement time history and the

第一作者: 韩文兵, 博士, 主要从事组合结构抗震、建筑结构抗连续倒塌以及大跨空间结构的抗风性能研究, hanwenbing@163.com。

通信作者: 陈景镇, 高级工程师, 主要从事金属屋面抗风揭性能研究, 1578339351@qq.com。

收稿日期: 2023-12-18

equivalent wind load of typical joints, the overall wind load value which could be used in this project design was obtained. The stress characteristics and instability modes of metal roofing in a strong wind environment were summarized, and the factors affecting the wind resistance of metal roofing were analyzed. The strengthening measures for wind resistance design of metal roofing were put forward, including enhancing wind resistance connection and locking height, rational selection of materials and structures, so as to provide a certain theoretical guidance and scientific basis for the design of such structures in the future.

Keywords: long-span metal roof; wind tunnel test; numerical calculation; wind-resistant bearing capacity; reinforcement measures

0 引言

钢结构的发展取得了显著成就,越来越多的现代建筑采用钢材来加工。金属屋面作为一种常用的建筑围护结构,在人类的发展历史中不断改进和创新,如今被广泛应用于各种大型建筑结构中^[1-2]。早在12世纪中叶,就有北欧地区的工匠通过简单咬合方式将几块碎小的金属铜片连接成整体并应用于一些建筑的屋顶结构上^[3]。15世纪初,人们开始在建筑中大量使用金属铅;1829年,英国工程师(Henry Palmer)首次设计出薄铁板并应用于仓库屋顶以及墙面上,这也是人类最早将金属板应用于建筑结构的实例。19世纪中期,镀锌金属板被广泛使用在屋面结构中。根据固定方式、屋面板的板型以及连接形式,金属屋面可以分为螺钉穿透式固定屋面系统、扣合式系统和直立锁缝咬合屋面板系统^[4-5]。随着体育场馆、会展中心以及大型游乐场馆等的新建或改建工程越来越多,直立锁边金属屋面因其结构形式优美、强度高、耐腐蚀、易加工、结构跨度大、质量轻、防水性能好,被广泛应用于机场、交通站台、体育馆等现代大型公共建筑结构中^[6-8]。

针对金属屋面的抗风性能,国内外学者已进行了大量试验研究和理论分析。李明等^[9]通过采用理论分析方法研究了檩条间距、板厚和板宽等参数对于直立锁边屋面板抗风揭性能的影响,结果表明:减小檩距、增加板厚和板宽等形式可以增加屋面板的抗风揭性能。王海涛等^[10]通过静力试验研究了不同参数变化和加固方式对其屋面板抗风承载力和破坏模式的影响,结果表明采取合理加固措施可以有效地提高金属屋面板的抗风吸承载力。Farquhar等^[11]完成了简化的直立锁边金属屋面系统风洞试验,探究其受力特点和破坏形态,发现不同风向角下金属屋面的抗风揭性能存在明

显差异。文献[2,12-13]通过试验方法和理论分析对直立锁边金属屋面板抗风揭性能进行研究,分析了风荷载下的变形特点,结果表明屋面板锁缝咬合处与支座连接部位是影响其抗风揭性能的关键部位。高翔^[14]、秦国鹏等^[15]、常波等^[16]研究了直立锁边屋面板的抗风性能,主要参数包括支座、锁具类型和分布等,研究发现,在抗风试验中屋面板与支座的咬合处以及不同屋面板间的连接部分是决定抗风承载力的关键部位。刘威^[17]通过抗风揭试验研究发现,屋面板的破坏除了锁边与支座咬合处脱开外,还会导致屋面板的撕裂破坏。Schroter^[18]通过静力测试方法得到了屋面板的抗风揭承载力,并对影响因素进行了讨论。陈辉^[19]针对金属屋面的抗风能力,主要考虑锁边与支座的连接方式,提出了一种新型加固方式,以提高屋面系统的抗风承载力。

当前对于金属屋面的抗风设计已有相当多的研究,大多数金属屋面系统的设计普遍采用GB 50018—2002《冷弯薄壁型钢结构技术规范》^[20]和GB 51022—2015《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》^[21]的规定。金属屋面由于其作用荷载的复杂性和多样性,仅通过当前的设计规范还不能完全确定其设计风荷载^[6,22-24]。为此,本文以厦门国际博览中心金属屋面工程为背景,基于风洞试验研究了大型金属屋面在强风荷载环境下的抗风性能,并分析了金属屋面风揭破坏的原因以及加固措施,以期为其抗风设计提供理论指导和实际意义。

1 工程概况

本工程位于厦门市翔安区新店镇刘五店片区滨海东大道与翔安隧道交叉口西南侧,是厦门东部体育会展新城的沿海核心地带,项目整体布局如

图1所示。会议中心项目总建筑面积23.11万 m^2 ,地上建筑面积16.9万 m^2 ,建筑高度68.55 m,最大跨度81 m,属于一类高层建筑。同时要求按百年一遇基本风压取值,使得整体屋面设计复杂化。安装过程中既要保证整体线形符合设计方案,又要达到抗风揭、防渗漏的质量要求,施工难度较大。

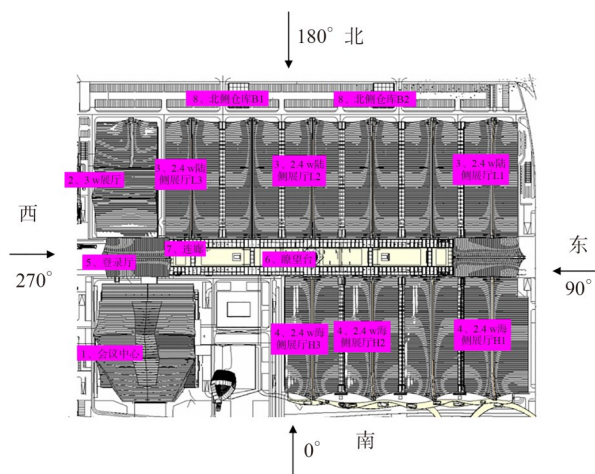


图1 金属屋面项目

Fig. 1 Typical metal roof project

厦门国际博览中心位于翔安东部的海边,位于翔安区地铁3号线(规划刘五店站)以东、滨海东大道以南、规划滨海公园大道以北、翔安隧道(隧顶公园)以西范围之间,包含展览中心和会议中心两大功能,定位为国际大型展览中心兼具国际高端商业会议功能。主要由会议中心、3w展厅、2.4w陆侧展厅、2.4w海侧展厅、登录厅、连廊、瞭望台和北侧仓库等组成。

2 风洞试验

2.1 模型及测点布置

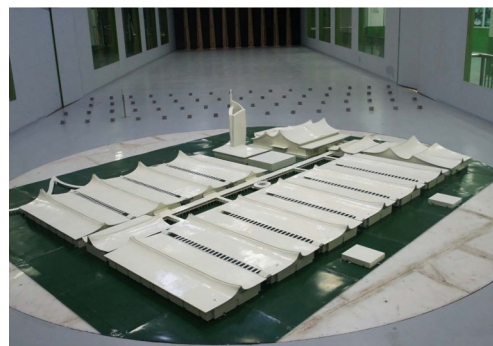
厦门国际博览中心建筑造型复杂,当前我国规范对于这种造型独特的建筑结构缺乏相应的体型系数和风振系数规定。为了保证结构设计的安全、经济、合理,满足抗风揭的设计要求,有必要对厦门国际博览中心金属屋面进行风洞试验和风振计算研究。为模拟不同风速下大型金属屋面的受力状态,本文搭建了风洞试验平台。该平台由风洞实验室、模型支架、压力传感器、高速摄像机和数据采集仪等组成,可以模拟不同风速下的气流状态和金属屋面受力情况。

风洞试验模型为刚性模型,按几何相似的要求,采用玻璃钢、有机玻璃和(ABS)塑料等制作,部分构

件采用3D打印技术。模型缩尺比为1:220,如图2所示。在CGB-2风洞(试验段截面8 m×5 m)中进行试验,试验模型的最大堵塞面积约1.25 m^2 ,最大堵塞比为3.2%,满足JGJ/T 338—2014《建筑工程风洞试验方法标准》^[25]中小于5%的要求,试验所得的风压系数等无量纲参数,可直接应用于建筑物实体。



(a) 正侧



(b) 背侧

图2 洞试验模型

Fig. 2 Wind tunnel test model diagram

厦门国际博览中心屋面工程的所有测点布置情况如表1所示。本文主要介绍2.4w陆侧展厅的测点布置情况。总共进行了3个展厅的风洞试验,分别记为L1、L2和L3,3个陆侧展厅的测点布置完全一致,风向角如图1所示。2.4w陆侧展厅共有15个测区,其中,上表面(A:28,B:50,C:50,D:50,E:36,F:30,G:30,数字表示每个测区的测点数量,下同);下表面(FX:30,GX:30);北立面(H:43,N:10);南立面(J:37,P:10);西立面(K:16);东立面(M:16)。共布置466个测点,测点布置情况如图3所示。基本风压为100年一遇的0.95 kN/m^2 ,地貌为A类。

2.2 测试设备以及试验方法

1) 风洞和测试设备。

本试验在广东省建筑科学研究院的CGB-2边界层风洞中完成,风洞采用钢-混凝土混合结构形式。试验段为闭口式,长34 m,截面尺寸为宽8 m、

表 1 测点布置

Table 1 Summary of measuring point layout

序号	对象	测点总数	说明
1	会议中心	1034	
2	3w 展厅	544	
3	2.4w 陆侧展厅	466	3 个展厅:L1、L2、L3
4	2.4w 海侧展厅	478	3 个展厅:H1、H2、H3
5	登录厅	402	
6	瞭望台	16	
7	连廊	84	
8	北侧仓库	98	2 个仓库:B1、B2
总计		5108	

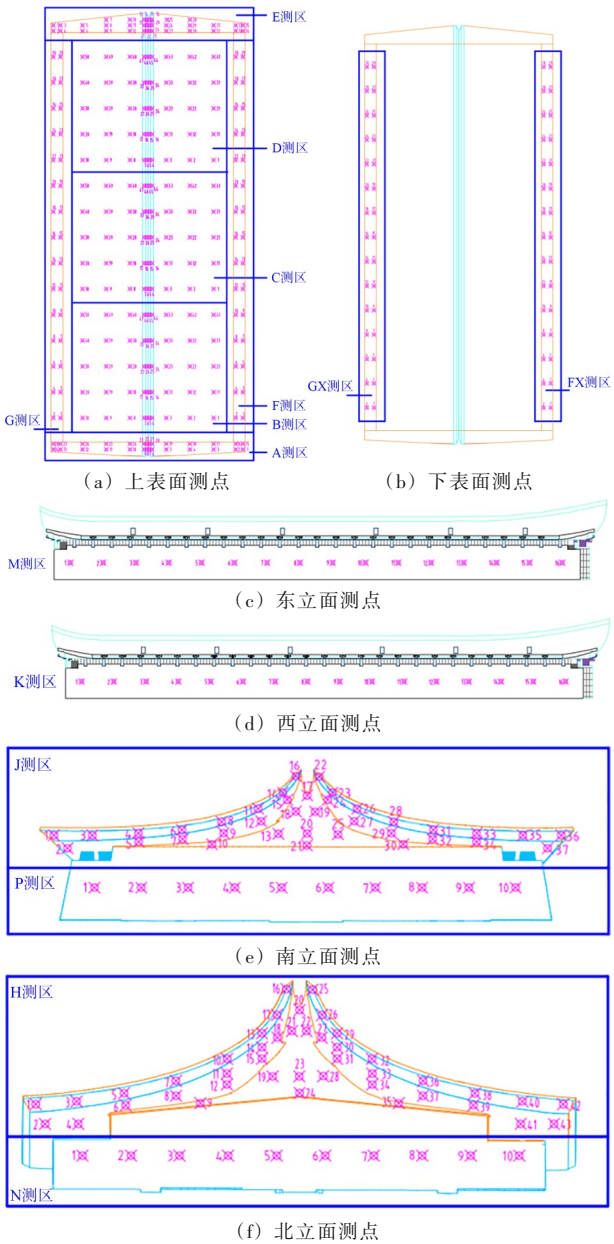


图 3 展厅测点布置

Fig. 3 Measuring point layout of the exhibition hall

高 5 m;风洞最高风速 35 m/s。在风速测量系统中,试验流场的参考风速用皮托管和微压计来测量和监控。大气边界层风场的模拟调试和测量采用丹迪 4 通道热线风速仪系统。在风压测量、记录及数据处理系统中,由美国 Scanivalve 公司电子扫描阀、A/D 数据采集板、PC 机以及自编的信号采集及数据处理软件,组成风压测量、记录及数据处理系统。该扫描阀有 8 个阀体,每个阀体上有 64 个测压通道,编号为 1~64 号。其中,63 号孔接皮托管的静压,64 号孔接皮托管的总压,因而每个阀体上用于模型测压的有效通道共 62 个。试验中所采集的原始信号都存储在 PC 机中。

2) 风场模拟。

考虑到周围的地形、地貌特点,按 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》^[26]确定该建筑的地貌粗糙度指数 $\alpha=0.12$ 。100 年一遇的基本风压为 0.95 kN/m^2 ,相当于离地面 10 m 高度处的风速 $V_0=38.99\text{ m/s}$ 。离地面不同高度处的风速用指数规律描述,如式(1)所示。

$$V_z = V_0 \left(Z/Z_0 \right)^\alpha \tag{1}$$

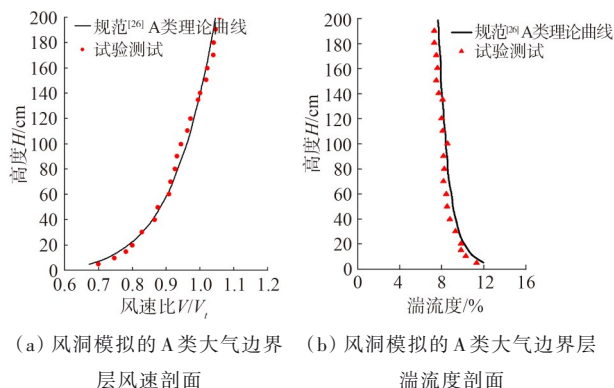
式中: V_0 为离地面 10 m 高度处,50 年重现期、10 min 的平均风速; V_z 为离地面高 Z 处的平均风速; α 为地貌粗糙度指数。

在风洞中,由风洞口的多功能模拟装置和风洞底壁的粗糙元来实现上述风速剖面的模拟,如图 3 所示,并在风洞试验前进行测试和校验,测得离风洞底壁不同高度的风速变化曲线如图 4(a)所示,图中还给出了通过式(1)计算的理论曲线,发现两者误差较小,符合试验要求,表明风洞试验模拟效果较好。

大气边界的空气流动,有着无数强度不同的涡流,湍流度就是表征这种涡流强度特性的参数,其随着离地面高度的增加而减少,与平均风速、时距以及地面粗糙度有关。根据 GB 50009—2012^[26],湍流度随地面高度的变化可用式(2)来描述。

$$I_u = I_{10} \left(\frac{Z}{10} \right)^{-\alpha} \tag{2}$$

式中: Z 为离地面高度; I_{10} 为 10 m 高处名义湍流度。风洞模拟的湍流度如图 4(b)所示,可以发现模拟结果与式(2)的理论计算值比较接近。风洞流场的准确模拟可为平均风压、脉动风压测量的可靠性提供重要保障。



(a) 风洞模拟的 A 类大气边界层风速剖面 (b) 风洞模拟的 A 类大气边界层湍流剖面

注: V 为来风风速; V_L 为临界风速。

图 4 风洞模拟的 A 类大气边界特征

Fig. 4 Class A atmospheric boundary characteristics in wind tunnel simulation

3) 试验方法。

在风洞内完成大气边界层的模拟后,将测压试验的模型安装在风洞试验段的转盘上,转盘中心与模型中心重合。风洞试验时,每个风向角为一个工况,风向角变化间隔 15° ,测压风向角从 $0^\circ \sim 360^\circ$,共 24 个工况,定义的风向角及旋转中心如图 1 所示,按顺时针递增各工况的风向角一周。

建筑物的动态风压风洞试验与静态风压风洞试验虽然都采用刚性模型,但两者试验方法不同,测试内容也不同。动态风压试验是在模拟湍流的风场中,用电子扫描阀及数据采集分析系统记录一个时段内的各测点压力波谱,对其统计分析,得出风压系数的平均值、最小值、最大值以及标准差。根据国际通用的试验标准,动态风压采样时间应相当于实时 10 min,采集的数据样本必须足够多,才能获得真实的统计数据。本试验总共有 5088 个测点,每个测点每个风向角下测得 12000 个数据,共 24 个风向角,可见动态测压试验的数据量十分庞大。

本次风洞模型试验中,各测点风压系数的计算方法系按目前国内外风工程惯用方法,即按式(3)计算。由相似原理可知:模型的无量纲参数与实物的无量纲参数一致,因此模型上各测点的风压系数 C_{pi} 即为实物对应点的风压系数。

$$C_{pi} = \frac{P_i - P_\infty}{0.5\rho V_\infty^2} \quad (3)$$

式中: C_{pi} 为建筑物表面某测点 i 的风压系数; P_i 为测点 i 的风压值; P_∞ 为参考点静压力值; V_∞ 为参考点的风速,对于本次试验, $V_\infty = 12.4 \text{ m/s}$,参考点为模型高度 0.6 m ,对应实物高度 132 m 。

2.3 测试结果与讨论

2.3.1 围护结构风荷载标准值计算方法对比

目前,金属屋面外围护结构的风荷载标准值计算方法主要有两种,一种为峰值因子法,另一种为极值分析法。对比发现,对于高斯分布区域,两种方法非常接近;对于非高斯分布区域,极值分析法给出的结果更加合理。

图 5 给出了陆侧展厅围护结构设计风荷载中极值负风压的结果对比。可知:总体上两种方法的结果非常接近,对于高负风压区域,极值分析法的结果略大于峰值因子法。对于低负风压区域,峰值因子法的结果略大于极值分析法。因此,在围护结构的风荷载标准值计算中采用两种方法的包络结果较为安全。

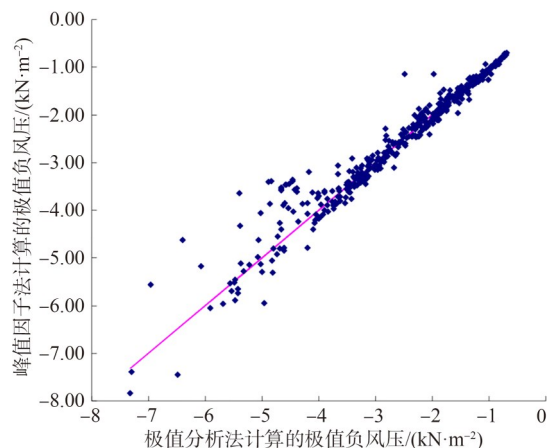


图 5 陆侧展厅围护结构所有测点的极值负风压对比

Fig. 5 Comparison of the ultimate negative wind pressure at all measuring points of the landside exhibition hall

2.3.2 陆侧展厅围护结构风荷载标准值

各个风向角下陆侧展厅围护结构风荷载标准值出现较大正值、较大负值的测点及相应的数据见表 2。2.4w 陆侧展厅共有 3 个,实际测试中分别测试最右边、中间和最左边,分别标记为 L1、L2 和 L3。由于试验结果中展厅 L2 的数据较小,建议可以参考展厅 L1 或 L3 的数据。

由表 2 可以发现:屋面出现较大脉动正风压与负风压的测点以及风向角都是不相同的,对于屋盖上表面来说, L1 位置处测点 FX25,最大脉动正风压达到 2.76 kN/m^2 ,此时风向角为 105° 。 L3 最大脉动正风压 (4.26 kN/m^2) 出现在北立面测点 (H25) 处,此时风压系数为 1.69 ,风向角为 195° 。最大负风压 (-7.83 kN/m^2) 出现在屋盖上表面测点 (E36) 处,此时相应的风压系数为 -3.64 ,风向角为 120° 。

表2 陆侧展厅各个风向角下出现较大脉动风压的测点及风向角
Table 2 Measuring points and wind direction angles of the land side exhibition hall

测点位置	展厅	正风压				负风压			
		测点编号	风压系数 μ	风压/(kN·m ⁻²)	风向角/(°)	测点编号	风压系数 μ	风压/(kN·m ⁻²)	风向角/(°)
上表面	L1	A2	0.41	1.33	90	A15	-3.43	-7.39	75
		B48	0.35	1.20	255	B34	-1.79	-3.85	75
		C46	0.39	1.29	165	C45	-1.77	-3.82	135
		D48	0.54	1.64	300	D34	-2.77	-5.96	135
		E26	0.70	2.00	90	E36	-3.64	-7.83	120
		F2	0.46	1.44	45	F29	-3.23	-6.96	60
		FX25	1.04	2.76	105	FX29	-1.58	-3.41	165
		A10	0.50	1.54	285	A23	1.49	-3.82	285
	L3	B8	0.30	1.08	270	B4	-1.25	-3.26	45
		C38	0.47	1.47	285	C37	-1.28	-3.32	240
		D48	0.52	1.59	285	D46	-1.49	-3.80	240
		E1	0.92	2.48	210	E1	-2.99	-7.18	225
		F27	0.42	1.35	240	F30	-0.68	-1.95	195
		FX30	0.44	1.40	165	FX29	-0.90	-2.43	180
下表面	L1	G24	0.67	2.07	105	G29	-1.28	-2.75	165
		GX29	0.55	1.81	90	GX30	-1.50	-3.24	165
	L3	G24	0.72	2.02	255	G30	-1.28	-3.31	195
		GX30	0.33	1.16	270	GX30	-1.10	-2.90	180
北立面	L1	H25	1.10	3.02	180	H25	-2.23	-4.80	135
		J35	0.62	1.97	45	J35	-1.46	-3.14	105
	L3	H25	1.69	4.26	195	H25	-1.50	-3.84	135
		J35	0.94	2.53	315	J22	-1.16	-3.06	285
西立面	L1	K16	0.92	2.43	225	K16	-1.01	-2.18	135
	L3	K16	0.84	2.26	240	K5	-0.89	-2.37	345
东立面	L1	M16	1.40	2.75	150	M16	-1.43	-3.07	90
	L3	M16	0.80	2.16	150	M15	-0.67	-1.88	180
南立面	L1	N1	1.02	2.66	165	N1	-1.45	-3.13	90
		P1	0.77	2.09	30	P4	-1.60	-3.45	105
	L3	N10	0.80	2.16	180	N1	-0.69	-1.91	210
		P6	0.35	1.15	315	P4	-0.60	-1.72	30

2.3.3 陆侧展厅屋盖表面体型系数等值线分布

图6以陆侧展厅L1和L3屋盖上表面的体型系数为例,给出了出现最大正风压和负风压下的体型系数等值线分布。由图6(b)可知:L1展厅在风向角为120°时,屋盖上表面体型系数等值线分布较为集中,绝大多数区域处于负风压,只有在展厅北侧局部地方出现正风压区域,等值线分布相对较稀疏。由图6(c)可知:当风向角为210°时,展厅L3屋盖上表面的体型系数等值线分布主要出现在三个区域。屋面东西两侧主要是正风压分区,中间部分主要为负风压作用区域,通常由于迎风面会出现较大的负风压作用,所以表面风压分布与风向角密切相关。

3 有限元模型及结果讨论

3.1 测试结果与讨论

本次计算中利用先前建立好的3D3S等模型,通过接口文件归并导入到ANSYS软件中的模型,图7为陆侧展厅结构的有限元模型,模型总节点数为18542个,其中,直接承受风荷载的节点数为3424个,杆件个数为6317。

3.2 风振计算结果分析

屋盖结构典型节点,即1147号节点[图7(a)]在90°风向角下的三向位移时程如图8所示。可知:在90°风向角下,该节点以Z方向(竖直向)的正位移为主,X方向(横风向)与Y方向(顺风向)的位移几乎为零。

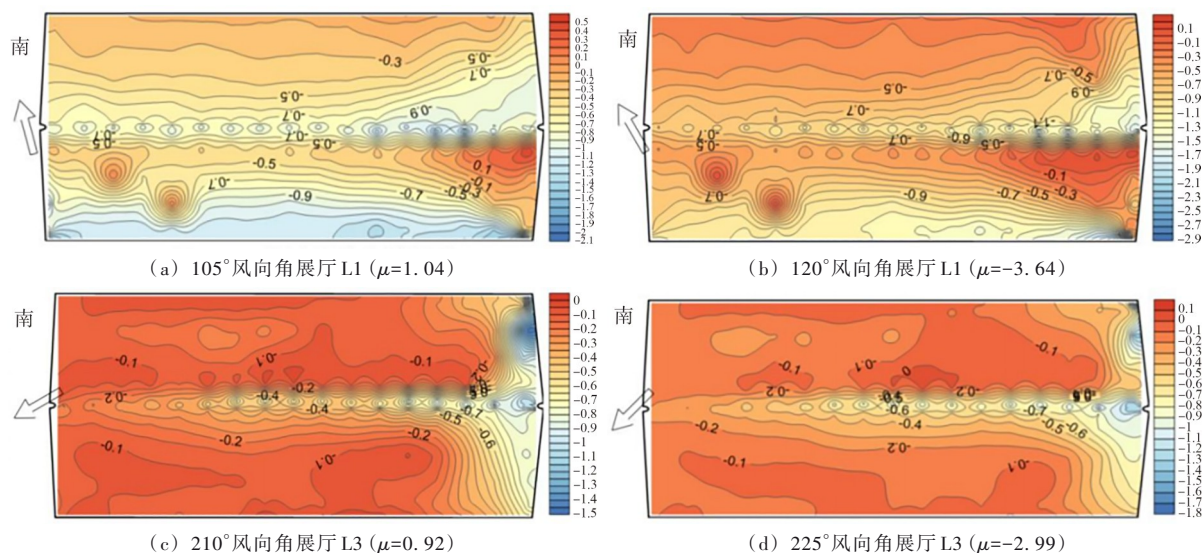


图 6 最大脉动风压下的体型系数等值线分布

Fig. 6 The distribution of the body shape coefficient

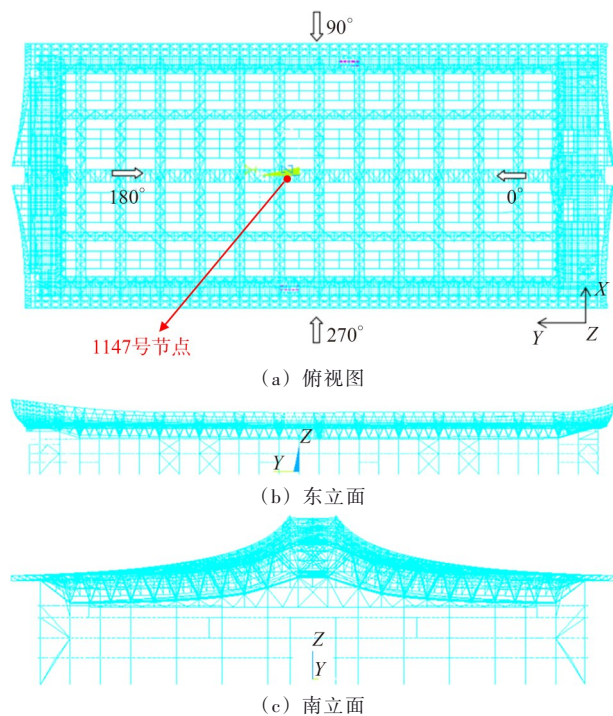


图 7 陆侧展厅屋盖结构 ANSYS 有限元模型

Fig. 7 ANSYS finite element model of roof structure in the land-side exhibition hall

图 9 给出了屋盖结构 1147 节点在各风向角下的平均位移时程。可知:1)该节点以 Z 方向的位移为主, X 和 Y 方向的位移几乎为零;2)该节点 Z 方向位移中,所有位移均为向上,其中,90°风向角的位移最大,说明这个风向角下屋盖结构在 1147 号节点所在位置附近受到的风吸力较大。

表 3 为计算获得的屋面上层节点在 Z 方向的平均风荷载和等效风荷载值,该风荷载已经考虑了挡

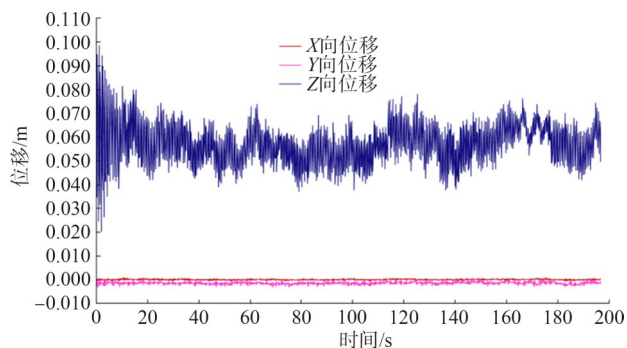


图 8 节点 1147 号在 90° 风向角下的位移时程

Fig. 8 Displacement history of joint 1147 at 90° wind direction angle

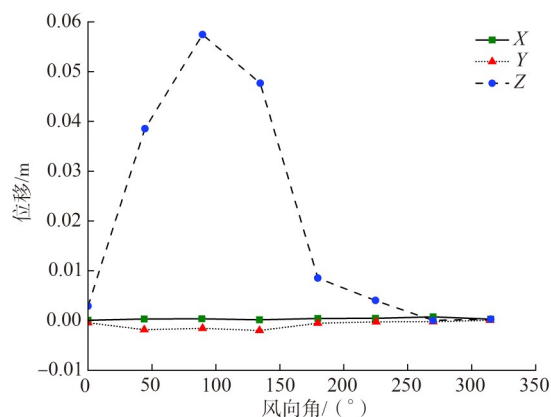


图 9 节点 1147 号在各风向角下的位移平均值

Fig. 9 The average displacement of joint 1147 at various wind directions

风面积。图 10 给出了 2.4w 陆侧展厅在 X、Y、Z 三个方向的平均风荷载和等效风荷载。可知:Z 方向等效风荷载与平均风荷载,在 90°风向达到最大(正值),最大风荷载对应的整体风振系数为 1.72。X 方向风荷载也在 90°风向达到最大值,但仍远小于 Z 方

表3 陆侧展厅屋盖结构 z 方向的整体合力
Table 3 The overall force in the z direction of the roof structure of the landside exhibition hall

风向角/(°)	Z方向平均风荷载/(kN·m ⁻²)	Z方向等效风荷载/(kN·m ⁻²)	Z向整体风振系数
0	6591	15804	2.40
45	41582	68949	1.66
90	64824	111318	1.72
135	61820	107184	1.73
180	15456	29294	1.90
225	9587	19471	2.03
270	2706	4964	1.83
315	3169	6787	2.14

向的风荷载值。 Y 方向的风荷载值在风向角为 90° 时达到了最小值且均为负值。因此,屋盖结构风荷载分布以 Z 方向受力状态为主。

4 金属屋面风揭破坏探讨及加固技术

4.1 风揭破坏探讨

随着当前金属屋面使用类型的多样化以及不同建筑构造的要求,屋面在服役过程中出现了各种工程问题,作为轻质且不连续的金属屋面结构,抗风揭问题较为突出。这种情况不仅发生在沿海强台风地区,在内陆也是比较常见的。图11中给出了国内典型的屋面风揭破坏模式。在汶川、雅安等地地震和“莫兰蒂”“山竹”等台风暴雨过程中,金属屋顶飞掉、倒塌等安全问题曾引起广泛关注。

分析发现,屋面系统破坏主要是由于以下几种原因造成的:1)屋面抗风承载力设计偏低;2)支座与檩条间连接强度不够;3)屋面板锁缝、咬合处连接失效。大量的屋面风揭破坏事故研究分析表明,金属屋面系统抗风承载力主要取决于连接处的强度。

这些灾害问题严重威胁了人民生命安全,也阻碍了金属屋面系统在工程中的应用。因此,有必要深入探究金属屋面系统的抗风受力机理,提出相应的改进措施,提高其抗风承载力。针对前述原因分析发现,屋面出现风揭破坏现象多半是由金属屋面板与固定支座之间的连接脱开造成的。在负风压作用下,屋面板首先出现如图12所示的上拱变形,当风吸力过大时,会造成屋面板与支座咬合脱开或者导致支座与屋面檩条连接处破坏。金属屋面抗风力学性能分析,主要包括以下几点:

1)受力特点。

金属屋面在风荷载作用下受到的主要荷载为

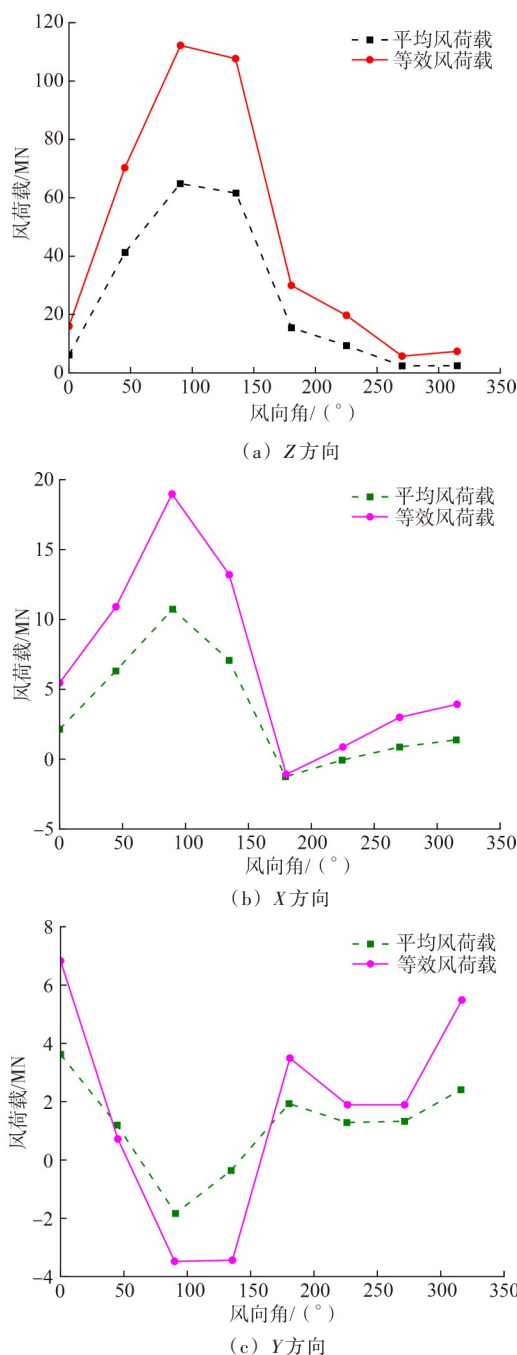


图10 陆侧展厅屋盖结构风荷载合力
Fig. 10 Wind load of landside exhibition hall roof structure

气压力、摩擦力和吸力。其中,气压力主要作用于屋面底板,摩擦力主要存在于屋面和风之间的摩擦面上,风吸力则主要作用于屋面顶板。当风速较高时,屋面上的压力和吸力将会增大,而摩擦力基本保持不变。

2)失稳形态。

金属屋面在强风环境下会出现多种失稳形态,主要包括局部压曲、整体屈曲和局部剪切破坏等,



(a) 首都机场 T3 航站楼



(b) 武汉天河机场

图 11 典型的金属屋面风揭破坏
Fig. 11 Typical metal roof wind damage

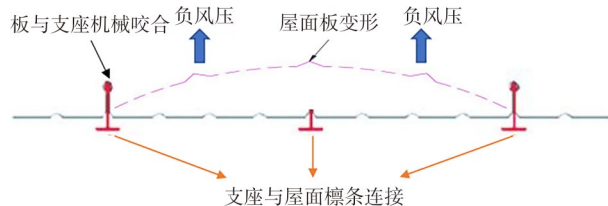


图 12 直立锁边金属屋面传力途径

Fig. 12 The load transfer way of standing seam metal roof plate

其中整体屈曲是最常见的失稳形态。

3) 影响因素。

金属屋面抗风性能受到多种因素影响,主要包括屋面形式、材料和构造设计、连接和支撑系统、屋面荷载大小等。其中,屋面荷载和屋面板的连接支撑形式是最主要的影响因素。

a. 屋面板材料:不同材质的屋面板抗风能力明显不同,一般要求金属屋面板具有超强的抗风揭能力和防水性能。因此,选择抗风能力强的金属材料是保证屋面抗风承载力的重要因素。各种材料各有特点,目前国内使用较多的为彩钢板屋面、镀锌锌屋面和铝镁锰板。

b. 屋面板型:屋面板型是指金属屋面板的尺寸、形状以及厚度。大跨度金属屋面的风荷载特性和抗风承载力研究进展显示,板型直接影响其抗风承载力。

c. 咬合方式:咬合方式是指多块金属屋面板之间的连接方式,连接方式缺陷可能导致连接强度减弱,从而影响屋面的抗风承载力。这种咬合式连接是指压型板通过板与板、板与檩条之间的相互咬合连接,其抗剪和抗弯承载力通过相互之间的咬合力来传递。咬合式金属屋面是对搭接式屋面的进一步发展,其面板连接方式属于隐藏式连接,螺钉不外露,因此防水性能有了很大提升^[27]。常见咬合方式主要分为平咬合、270°直立咬合以及360°直立咬合。研究发现,随着咬合角度的增加,金属屋面的抗风性能以及防水性能均有效提高。在风吸力作用下的传力机制目前还没有成熟的理论计算方式,因此对压型板屋面系统在风吸力作用下的受力性能常采用试验方式来确定。

d. 固定方法:固定方法是指金属屋面板与屋面结构之间的固定方法。在安装过程中,自攻螺钉的少打或漏打会导致连接强度减弱,从而影响屋面的抗风承载力。固定支座的选取直接影响屋面的受力性能,常见的固定支座按构件主要可分为铝合金固定支座和不锈钢固定支座。在设计和施工过程中,需要综合考虑以上因素,确保屋面的抗风承载力达到设计要求。

4.2 抗风揭加固措施

4.2.1 防风设计构造

直立锁边金属屋面在机场航站楼、大型工业厂房以及体育场馆等的应用中也发生了被风掀起的现象。对于当前使用较为广泛的直立锁边金属屋面系统,研究者提出了一些抗风加强优化的措施,主要包括5种:加强处理,宜确保重点区域、兼顾一般区域;屋面板的强度及与固定支座咬合部位的实际强度,宜通过抗风揭试验来确定;工程破坏案例验算与“短板效应”,提高金属屋面板与固定支座咬合部位的强度,如式(4)^[28]所示;屋面板不同区域与固定支座咬合部位加强的程度,可通过抗风揭试验来确定;避免屋面板板头出现“撕纸类似”的破坏连锁效应。

$$F = \min \{F_1, F_2, F_3, F_4\} \quad (4)$$

式中: F 为屋面系统最薄弱部分的承载力; F_1 为支座处的锁缝极限承载能力; F_2 为非支座处锁缝的极限承载能力; F_3 为固定支座的极限承载能力; F_4 为连接紧固件的极限承载能力。

4.2.2 本工程金属屋面抗风揭措施

金属屋面设计时,先由设计单位结合百年一遇

基本风压取值与屋面复杂造型进行风洞试验。形成各测点在所有风向角中的最不利正负风压图,选取图中每个区域最具代表性的风压数值进行分析,作为屋面系统各部件设计依据。然后分析风洞试验结果中的风压数值分布,划分出边区、角区、大面区等分区的位置和面积,同时确定各分区的最不利正负风压特征值;再根据特征值进行各分区的主次檩条截面、间距、紧固件连接、面板、夹具、檐口及屋脊等强度计算。

本工程在施工过程中遇到了一些问题,如图13所示:1)由于安装固定座的间距或角度存在误差,或是锁边机不容易操作的边角部位会出现屋面板锁边不完全,这些部位将成为抗负风压最薄弱位置,一旦有风灌入将会产生应力集中现象,就很有可能会被风掀开;2)遇强风时从檐口处被风掀翻或吹裂;3)由于檐口部位风压较大,在固定镀锌钢固定座时,若螺钉固定数量不足,会导致固定座的抗拔力减弱而被拔起。



(a) 锁边不完全



(b) 固定座抗拔力弱

图13 屋面板施工中易出现问题

Fig. 13 The problems in the construction of roof panels

金属屋面抗风性能是保证屋面结构安全性的前提,主要从3方面加强屋面的抗风性能:对屋面形态加强抗风设计,优先考虑系统使用的安全性,其次才是结构造型美观性,通过屋面选型提高抗风揭能力,在抗风等级要求较高的地区,应尽量避免使用铝合金材质的金属屋面。鉴于屋面构造设计对抗风承载力的影响,在屋面的特殊部位如檐口,拱起区域等采

取结构加强措施。为解决上述出现的问题,本项目也采取了一些加强措施。金属板的铺设要注意常年风向,板肋搭接需与常年风向相背。金属板间连接只搭接一个肋,且必须是母肋扣在公肋上。

1)在防风薄弱区域进行固定支座的加密处理,支座应沿着板长方向排列,严格按图纸设计进行安装,不得漏装、少装,保证固定座、连接件的材料质量。

2)在加密区域进行镀锌钢固定支座安装时,不能按一般区域的四颗螺钉来固定,而必须增加一道热浸镀锌钢支座来加强檐口部位的抗风性能。

3)镀铝锌直立锁边金属屋面系统采用镀锌钢固定支座固定,再将屋面板卡在几字形支座上,用电动锁边机将板肋锁在固定座上,不需穿透板面,避免产生应力集中问题,使屋面系统具有良好的抗风性能。

4.2.3 金属屋面抗风揭加固措施

为了提高直立锁边金属屋面的抗风揭性能,目前采用较多的加强措施主要包括以下方面:

1)增设抗风夹具。

直立锁边金属屋面系统最常用的加固手段是增设抗风夹。众多工程实例和抗风揭试验都证明了这一措施能有效提高直立锁边金属屋面系统的抗风承载能力。常用的抗风夹具形式如图14所示。增设抗风夹后,随着檩距减少,抗风夹的密度会增加,所以抗风夹密度增加对承载力有一定的提升效果^[17]。檩距越小,增加抗风夹对系统的承载力提升效果就越明显,因此各项加固措施是相互影响的。也有研究表明,增加抗风夹对脱扣破坏系统正常使用下的抗风承载能力提升率为35%~60%,对撕裂破坏屋面系统的提升率为25%~45%^[13,29]。可见,增设抗风夹对于提升金属屋面抗风承载力的效果比较显著。



图14 常用抗风夹的形式

Fig. 14 The form of wind resistance clip

2)加固锁边处的支撑结构。

研究发现,增加固定支座的数量和咬合节点的数量,对抗风承载力的影响较大。锁边处的支撑结构是金属屋面抗风揭性能的关键部分。加固锁边处

的支撑结构可以增强锁边的稳定性和强度,从而提高金属屋面的抗风揭性能。例如,在锁边处安装横向和纵向加强筋,可以增强锁边处的支撑结构稳定性。同时,减小檩条之间的距离,使屋面板竖向板的应力增长明显,避免了屋面板发生脱扣破坏,提升了屋面系统的抗风承载力,也更便于及时发现问题并更换屋面板,避免屋面系统进一步破坏。

3) 增加螺栓数量和强度。

连接方面,支座与屋面板通过锁边咬合连接,支座与下部檩条或压型板通过自攻螺钉连接,固定支座处使用高强螺钉或者增加螺钉数量。本工程将固定几字托的自攻螺钉数增加至6颗,如图15所示。这样可以增加锁边的连接强度和稳定性,提高金属屋面的抗风揭性能。此外,使用高强度螺栓和加固材料也可以提高金属屋面的抗风揭性能。



(a) 自攻螺钉4颗



(b) 自攻螺钉6颗

图15 自攻螺钉布置

Fig. 15 Tapping screws' layout

5 结论

在当前气候变化频繁、自然灾害频发的环境下,提高大型公共建筑结构的安全性是一个重要问题。本文以厦门国际博览中心金属屋面工程为背景,完成了风洞试验测试并对结果进行分析,得到陆侧展厅围护结构风荷载标准值、屋盖结构风荷载整体合力和最大风压作用下屋盖系统各风向角下的体型系数等值线分布结果,进而分析了金属屋面出现抗风揭现象的原因并讨论了常见的加固措施。主要结论如下:

1) 通过风洞试验模拟了不同风速下的气流状态和金属屋面的受力情况。陆侧展厅的构造复杂,空间造型新颖,通过风洞试验测试,得到了屋面系统不同区域在各个风向角下的位移时程曲线。发现以Z方向的位移为主,而X和Y方向的位移几乎为0。典型1147号节点的Z方向位移中,所有位移均为向上,其中,90°风向角的位移最大,说明这个风向角下屋盖结构在该节点所在位置附近受到了较大风吸力。

2) 通过ANSYS有限元计算获得3424个屋面上层节点在Z方向的平均风荷载和等效风荷载,该风荷载已经考虑了挡风面积,计算中基本风压为100年一遇的0.95 kN/m²。可知:上吸力作用下,Z方向等效风荷载和平均风荷载在90°风向上达到最大值,最大风荷载对应的整体风振系数为1.72。未来研究还需要进一步探索其他提高建筑物抗风揭性能的方法。

3) 总结金属屋面在强风环境下的受力特点和失稳形态,并分析了影响金属屋面抗风性能的因素。其次,以研究所在地厦门为例,结合厦门国际博览中心屋面工程经验和国家相关标准规范,提出了金属屋面抗风揭加固措施,包括增强抗风连接和锁边支撑结构,增设抗风夹具,增加固定支座螺栓数量,合理选用高强材料和新型构造等,可为增强金属屋面抗风承载力提供一定的参考。

参考文献

- [1] 刘军进,崔忠乾,李建辉. 直立锁边金属屋面抗风揭性能研究现状及展望[J]. 建筑科学, 2018, 34(5): 118-124.
- [2] 宋云浩,杨丽曼,王乾锁,等. 金属屋面板风吸力下变形特性研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(17): 87-91.
- [3] 陈伟,蒋杰,田建泉,等. 坪山高新区综合服务中心项目装配式金属屋面系统施工技术[J]. 施工技术, 2019, 48(22): 10-12.
- [4] 何惠文. 直立缝360°咬合式屋面系统简介[C]// 2008全国钢结构学术年会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 413-416.
- [5] 王宏斌,贾占坤,冯绍攀,等. 直立锁边铝镁锰板屋面系统抗风揭试验研究[J]. 工业建筑, 2018, 48(9): 176-180.
- [6] 王明明,辛志勇,葛连福,等. 直立锁边金属屋面系统抗风设计与结构承载力试验[J]. 建筑结构, 2022, 52(6): 9-13.
- [7] 张士翔,赖燕德,李庆祥. 直立锁边金属屋面系统风吸破坏机理研究[J]. 钢结构(中英文), 2020, 35(5): 10-18.
- [8] 金玉芬,杨庆山,李启. 轻钢房屋围护结构的台风灾害调查与分析[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(增刊2): 197-201.
- [9] 李明,殷小珠,张伟,等. 直立锁边屋面抗风性能有限元分析[J]. 钢结构, 2017, 32(8): 72-76.

- [10] 王海涛,王静峰. 大跨度空间结构金属屋面板抗风揭性能试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016, 39(1): 115-121.
- [11] FARQUHAR S, SURRY D, KOPP G A. Wind tunnel and uniform pressure tests of a standing seam metal roof model [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(4): 650-659.
- [12] 于敬海,李路川,盖力,等. 直立锁边金属屋面系统抗风承载力节点试验研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(17): 83-86.
- [13] 许秋华,万恬,刘凯. 直立锁缝金属屋面加强抗风揭能力的优化设计[J]. 工程力学, 2020, 37(7): 17-26.
- [14] 高翔. 蚌埠体育中心龙鳞金属屋面抗风性能试验及理论分析[D]. 合肥:合肥工业大学, 2019.
- [15] 秦国鹏,刘美思,刘毅,等. 金属屋面系统抗风揭性能的试验研究[J]. 钢结构, 2016, 31(3): 26-28.
- [16] 常波,梅献忠,钱昀,等. 直立锁边金属屋面的抗风性能研究[J]. 建筑施工, 2014, 36(6): 701-702.
- [17] 刘威. 带抗风夹的直立锁边金属屋面系统抗风性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.
- [18] SCHROTER R C. Air pressure testing of sheet metal roofing[C]// Proceedings of the Second International Symposium on Roofing Technology. Gaithersburg, MD: NRCA, 1985: 1-6.
- [19] 陈辉. 直立锁边金属屋面的抗风构造性能试验研究[J]. 钢结构, 2018, 33(8): 20-23.
- [20] 中华人民共和国建设部. 冷弯薄壁型钢结构技术规范: GB 50018—2002[S]. 北京:中国计划出版社, 2002.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 门式刚架轻型房屋钢结构技术规程: GB 51022—2015[S]. 北京:中国计划出版社, 2015.
- [22] 易桂香,段威阳,王越,等. 基于抗风揭试验的改进型360°直立锁边压型钢板屋面抗超强台风性能分析[J]. 工业建筑, 2021, 51(12): 79-83.
- [23] 曾祥新. 自攻螺钉固定压型板金属屋面抗风承载力及风致疲劳破坏研究[D]. 广州:华南理工大学, 2015.
- [24] 金新阳,陈凯,唐意,等. 建筑风工程研究与应用的新进展[J]. 建筑结构, 2011, 41(11): 111-117.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑工程风洞试验方法标准: JGJ/T 338—2014 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2014.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
- [27] 李路川. 大跨度场馆上金属屋面系统抗风性能研究[D]. 天津:天津大学, 2014.
- [28] 孙成疆. 直立锁缝金属屋面系统在模拟极端暴风工况下抗风揭能力测试和分析[J]. 建筑结构, 2011, 41(增刊1): 1438-1442.
- [29] 关伟梁. 典型金属屋面板的抗风承载能力研究[D]. 广州:华南理工大学, 2019.