Vol. 48

Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)

DOI:10.13718/j. cnki. xsxb. 2023.07.015

No. 7

# 乌鲁木齐机场直立锁边屋面动态抗风揭试验研究®

赵锐1,2, 冯志良1, 杨向阳3, 冯磊4

新疆大学 建筑工程学院,乌鲁木齐 830017;2. 新疆建筑结构与抗震重点实验室,乌鲁木齐 830017;
 中建三局集团有限公司,乌鲁木齐 830011;4. 中建新疆建工(集团)有限公司,乌鲁木齐 830011

摘要:以乌鲁木齐机场北区扩建工程为研究背景,通过足尺直立锁边屋面动态抗风试验研究屋面檩条间距、抗风 夹布置、抗风夹数量和屋面长度与屋面动态抗风承载能力之间的关系.试验结果表明,增加檩条间距并不能提升屋 面动态承载能力,增设抗风夹可以显著提升屋面动态承载能力;屋面布置抗风夹时,屋面破坏形式由脱扣破坏转变 为抗风夹与屋面板接触位置的撕裂破坏;屋面板长度与屋面抗风夹数量将显著影响屋面动态承载能力,具体来说 屋面板长度越短,动态循环荷载作用下屋面板材料损伤累计越小,承载能力越高;在同样的循环荷载作用下,增设 抗风夹数量将导致单个抗风夹与屋面板接触位置的应力下降,从而提升屋面板动态承载能力.

关键 词:直立锁边屋面系统;动态抗风揭试验;屋面参数

中图分类号:TU312<sup>+</sup>.1 文献标志码:A 文章编号:1000-5471(2023)07-0101-08

# Experimental Study on Dynamic Wind Resistance of Standing Seam Roof System in Urumqi Airport

## ZHAO Rui<sup>1,2</sup>, FENG Zhiliang<sup>1</sup>, YANG Xiangyang<sup>3</sup>, FENG Lei<sup>4</sup>

1. College of Architecture and Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China;

2. Xinjiang Key Lab of Building Structure and Earthquake Resistance, Urumqi 830017, China;

3. China Construction Third Engineering Bureau Group Co., Ltd., Urumqi 830011, China;

4. China Construction Xinjiang Construction & Engineering (Group) Co., Ltd, Urumqi 830011, China

Abstract: Taking the expansion project of the North District of Urumqi Airport as the research background, this paper studies the relationship between the spacing of sandalwood strips, the arrangement of anti-wind clips, the number of anti-wind clips, the length of the roof, and the dynamic wind-resistant bearing capacity of the roof through the full-scale standing seam roof system dynamic wind resistance test. The results showed that increasing the purlin spacing can not improve the dynamic bearing capacity of the roof; When

① 收稿日期:2022-11-14
 基金项目:新疆建筑结构与抗震重点实验室资助(XJDX1703).
 作者简介:赵锐,博士,副教授,主要从事极端天气下钢结构的理论及其应用研究.
 通信作者:冯志良,硕士研究生.

the anti-wind clip was arranged on the roof, the roof failure mode changes from the tripping failure to the tearing failure at the contact position between the wind-resistant clip and the roof panel; The length of the roof panel and the number of roof anti-wind clips can significantly affect the dynamic bearing capacity of the roof. Specifically, the shorter the length of the roof panel, the smaller the cumulative damage of the roof panel material under the action of dynamic cyclic loads, and the higher the bearing capacity; Under the same cyclic load, increasing the number of anti-wind clips can reduce the stress at the contact position between a single anti-wind clip and the roof panel, thereby improving the dynamic bearing capacity of the roof panel.

Key words: standing seam roof system; dynamic wind-resistant test; parametric study

金属屋面于 20 世纪 80 年代自欧洲引入我国以来,已经发展了近 40 年.进入 21 世纪后,随着我国经济 飞速发展和人民生活水平提高,越来越多的公共建筑采取大跨度空间结构这一外形优美的结构形式,而金 属屋面由于质轻、易于加工以及外形优美等特点被广泛用作该类建筑的屋顶面材.在各种形式的金属屋面 中,直立锁边金属屋面由于较好的防水性、抗腐蚀性和可以自由释放温度应力等特性 在近些年的工程中得 到了非常广泛的应用<sup>[1]</sup>.

大跨度直立锁边金属屋面由于自重轻、跨度大以及自振周期长等特点是建筑围护结构中最容易受到大风影响的构件<sup>[2]</sup>.近年来国内直立锁边屋面风揭破坏频发,北京 T3 机场航站楼在 2010~2012 年的两年时间中发生了 3 次风揭破坏,破坏时的风荷载均未达设计荷载;武汉天河机场二期工程于 2007 年在 11 级大风作用下屋面被掀起导致破坏,而工程按照设计可抗 12 级大风<sup>[3]</sup>,除了上述的典型事故外,有统计显示自 21 世纪以来,我国每年都会有大型建筑的金属屋面发生风致破坏<sup>[4]</sup>.

风灾事故成因调查表明当高强度的大风吹过建筑物时,由于建筑物的阻挡,风的流向将会改变,从而 在建筑物表面产生复杂的涡流,而这种涡流将会对建筑物表面产生持续并且高动态的风吸力,最终导致屋 面损坏.由于风灾事故频发,目前国内已有许多学者对直立锁边屋面参数与抗风揭性能之间的关系进行了 较为详细的研究:于敬海等<sup>[3]</sup>和秦国鹏等<sup>[5]</sup>针对直立锁边屋面进行了静力试验,试验结果指出屋面板和 T 型梅花支座之间的锁缝是屋面的薄弱部位;刘军进等<sup>[6]</sup>对直立锁边屋面进行了静态加载试验,研究了屋面 参数对屋面抗风能力的影响,该研究指出所有试件的破坏均是由于锁边咬合处脱开造成的,锁边咬合处初 始缝隙缺陷会显著降低直立锁边金属屋面的抗风揭能力.陈玉<sup>[7]</sup>通过数值模拟研究了屋面参数对带抗风夹 直立锁边屋面抗风承载能力的影响,确定了屋面系统的主要破坏形式和破坏准则,得出了带抗风夹直立锁 边屋面极限承载能力公式.除此之外,许多学者利用风洞、风墙、压力加载装置等仪器,研究了直立锁边屋 面在风荷载作用下的抗风性能,并提出改进屋面系统抗风性能的建议<sup>[8-15]</sup>.目前关于屋面静态极限承载能 力与屋面参数之间的关系已研究得较为透彻,但屋面动态抗风揭性能与屋面参数之间的关系还不明确.

新疆气候条件特殊<sup>[16-17]</sup>,"三山夹二盆"的地形地貌造就了新疆多处是"风口",每年 11 月至次年 5 月, 风多、风急便成了新疆区别于其他省(市、自治区)的一大显著特点.乌鲁木齐临近达坂城风区,最大风速 55 年平均值为 18.2 m/s,属暴风.在此背景下,本研究以新疆乌鲁木齐机场 T4 航站楼改扩建工程为背景,通 过动态抗风揭试验研究屋面参数与屋面抗风性能之间的关系,为该工程设计提供了试验依据.

## 1 工程概况

乌鲁木齐国际机场北区改扩建工程航站楼(本文简称"航站楼")是一座超大型大跨屋盖结构,包括主楼、换乘中心、指廊、车库等. 航站楼如图 1 所示,为乌鲁木齐经济规划中重要的交通枢纽,人流密集,公众关注度高,安全等级为一级;该工程所处的地理环境特殊,而近年来因气候变化造成极端气候事件发生的频率增加,最大风速常超过百年一遇. 航站楼最高点处高度约 55 m,平面横向最大宽度约为 835 m,纵

向最大长度约为 762 m,属于典型的大跨度结构. 主楼楼面面积约 12.7 万 m<sup>2</sup>,南、北指廊楼面积约 2.7 万 m<sup>2</sup>,中指廊楼面积 1.5 万 m<sup>2</sup>,屋面总面积约 19.6 万 m<sup>2</sup>.所有屋面均采用直立锁边镀铝锌钢屋面作为屋面 系统,结构详图见图 2.



图1 航站楼屋面鸟瞰图



图 2 直立锁边结构示意图

## 2 试验风压的确定

### 2.1 动态加载方案的对比

当开展直立锁边屋面动态抗风揭试验时,采用不同的动态加载方案将会导致试验结果有相当大的差 异,为了保证试验结果能够尽可能准确模拟建筑物在台风作用下的实际受力情况,选择加载方案时,需要 详细对比国内外各类抗风揭试验方案的异同和优劣.

目前国际上较为主流的抗风揭试验方案有 3 类,分别是美国 ANSI/FM 4474 试验方案、欧洲 ETAG 006 试验方案以及加拿大 CSA A123.21 试验方案,除此之外,国内虽然在直立锁边屋面性能上的研究起步较晚, 但也提出了中国 JGJ 252 试验方案.

具体来说,美国 ANSI/FM 4474 方案采用尺寸为宽 3.7 m、长 7.3 m 的标准试样进行静态加载试验, 每级荷载梯度为 0.7 kPa,持续时间为 60 s,逐级加载直至屋面破坏.欧洲 ETAG 006 规范采用压力箱进行 动态气压加载,并规定固定件由至少每排 5 个总共 3 排构成或者每排 4 个总共 4 排构成.ETAG 006 方案 实验的起始荷载值最大为 300 N,此后以 100 N 作为荷载梯度逐级加载直到屋面板破坏,由此确定屋面板 的最大承载力.随后以该荷载值作为最大风荷载标准值,从 40%的风压开始循环加载,循环次数为 500 次, 之后提升风压至 60%,循环 200 次,如此重复直至屋面破坏或全部循环结束.每一次循环的持续时间为 10 s,升压 2 s,持续施加压力 2 s,随后缓慢降压 6 s.中国 JGJ252 方案在密闭压力箱中进行,采用动态加 载结合静态加载的方式.压力箱长宽的为 3.05 m,压力等级分为 15 级,交替施加动态压力和静态压力.

以上3种方案均存在一些问题.对于美国 ANSI/FM 4474 试验方案来说,虽然有逐级加载的过程,但 本质上其加载是一个准静态的过程,和实际的动态循环作用差距极大;对于欧洲 ETAG 006 试验方案来 说,该方案通过静态加载确定屋面破坏荷载值,之后以此荷载值作为最大荷载进行等比例的逐级加载,但 由于屋面受到脉动风的作用,屋面的实际破坏值并不是静态风荷载作用下的荷载值,而且该循环加载方案 的加载序列也并不能反映实际台风在屋面的作用.中国的 JGJ 252 方案提出时间不长,其静态荷载与动态 荷载相结合的加载方式的准确性还有待验证.

本次试验采用加拿大 CSA A123.21-04 动态循环加载方案<sup>[18]</sup>.该方案是国外较为主流的动态循环加载 方案,其特点在于荷载循环序列是由全球各地气象台所记录的台风时程数据,通过雨流计数法统计而来, 可以最大程度模拟台风的脉动风作用,其序列由8组循环荷载组成,每一次循环加载时间为10 s,共进行 5 000次循环.该方案建议的循环荷载组见图3.

对于此方案来说,需要确定屋面的最大风荷载才可确定每一组循环所对应的风荷载大小,而现行荷载

$$\omega_k = \beta_z \mu_z \mu_s \omega_0 \tag{1}$$

式中: $\beta_z$ 为高度 z 处的风振系数; $\mu_z$ 为风压高度变化系数;  $\mu_s$ 为风荷载体形系数; $\omega_0$ 为基本风压.公式中的风振系数  $\beta_z$ 与风压高度变化系数 $\mu_z$ 可以直接由规范取得,但对于形 状不规则的大跨度屋面结构来说,风荷载体形系数 $\mu_s$ 无法 直接由规范或计算得到,现行的基本风压 $\omega_0$ 的选取也不满 足动态抗风揭试验的要求,因此加拿大 CSA A123.21-04 动 态循环加载方案需要先对屋面进行缩尺风洞试验来确定屋 面的最大负风压从而确定动态抗风揭试验的风荷载<sup>[1]</sup>,这



导致 CSA A123.21-04 方案成本高,试验周期长,但也是上述方案中最准确最贴合实际的加载方案.

#### 2.2 风洞试验概况

本工程刚性模型风洞试验在同济大学 TJ-3 大气边界层风洞展开,试验中的基本风压取 0.4,0.6, 0.7 kPa 3 类,分别对应 10,50,100 年的重现期. 航站楼刚性缩尺模型见图 4,缩尺模型采用有机玻璃板和 ABS 板制成,有足够的强度和刚度,在实验风速下不会发生变形,并且不出现明显的振动现象,以保证压力测量的精度.考虑到实际建筑物和周边建筑情况,其几何缩尺比例取 1:200.模型与实物在外形上保持几何相似.风洞试验时间缩减比例为 1:41.5 以及 1:38.4(对应50 年及 100 年重现期),风速缩尺比例为 1:4.82以及 1:5.21(对应 50 年及 100 年重现期).风洞测压试验的参考点风速为 11.0 m/s. 屋面总共布置测点数为 3 483 个,分块编号 1-64.考虑到建筑部分位置有内、外(上、下)两面受风的情况,在该部位每个测点位置需布置 1 对测点,每对测点包括外、内(上、下)表面两个测压孔,以同时测量该点处内、外(上、下)表面的压力,而该测点最终的压力为内、外(上、下)表面压力之差.

风场按照文献[20]提供的方法进行模拟,在风洞中模拟大气边界层风场是建筑模型风洞试验的重要内容.根据机场航站楼数公里范围内的建筑环境,确定本试验的大气边界层流场模拟为 B 类地貌风场,风场定义见我国建筑结构荷载规范<sup>[19]</sup>.以1:200的几何缩尺比模拟了风场(图 5).同时模拟了位于周边的主要建筑.试验时将测试模型放置在转盘中心,通过旋转转盘模拟不同风向.风向角以风从北偏西的方向吹来为0°风向角,每15°取一个风向角,共有24个试验工况.方位及风向角见图 5.

测压信号采样频率约为 312.5 Hz,每个测压孔采样样本总长度为 9 000 个数据.根据相似比,对应于 实际采样时间约为 1 106 s(100 年重现期).试验中,对每个测压孔在每个风向角下都记录了 9 000 个数据 的风压时域信号,加上所采集的参考点总压和静压的数据,共记录了约 7.52 亿个数据.

为消除风压信号经过测压系统后的畸变影响,利用测压管路系统的传递函数对试验采集的风压数据进行了修正.



缩尺刚性模型

图 4



图 5 风向示意

#### 2.3 动态实验风荷载目标值

在进行建筑结构设计时,一般是以 10 min 的平均风速下的风压值再考虑放大系数(规范中定义的风振 系数)作为风荷载值.其计算公式为:

$$\omega_{\text{mean, }i} = C_{p_{\text{mean, }i}} p_G = C_{p_{\text{mean, }i}} \left(\frac{350}{10}\right)^{0.3} w_{\text{OR}}$$
(2)

或者根据建筑物体形系数以及所在地区的基本风压,按照(1)式进行计算.(2)式可以定义不同统计时间的平均风速下的风荷载值,更为准确,因此本研究采用(2)式进行计算.

(2) 式中*i*为统计风速的时间长度,当取10 min时,*i*值为10. *C*<sub>*p*mean.*i*</sub>为*i*分钟内的风压系数平均值,由于风压是随机变量,因此为了获得平均风压系数,需要对数据进行统计分析.其值由风压系数极大值*C*<sub>*p*max</sub>和风压极小值*C*<sub>*p*min</sub>来确定:

$$C_{p_{\text{max}}} = C_{p_{\text{mean}}} + kC_{p_{\text{ms}}}$$

$$C_{p_{\text{min}}} = C_{p_{\text{mean}}} - kC_{p_{\text{ms}}}$$
(3)

式中: k 为峰值因子, 取值范围为 2.5 ~ 4, 本次试验取  $k = 3.5^{[21]}, C_{p_{rms}}$  为物体表面无量纲的系数, 表示为:

$$C_{p_{\rm rms}} = C_p Scale \times \frac{p_n - p_{\infty}}{p_0 - p_{\infty}}$$
(4)

式中: $p_n$ 为作用在测点n处的压力, $p_0$ 和 $p_\infty$ 分别为试验参考高度处的总压和静压. $C_p$ Scale 是将风洞测得的风压系数换算到以梯度高度风压为参考风压的换算因子.

目前国内规范规定取 10 min 的最大平均风速作为平均风压的计算风速值,而美国规范则取 3 s 内的最 大平均风速作为平均风压计算风速值<sup>[22]</sup>,这一差别将导致风压幅值相差达到一倍以上,由于中美直立锁边 结构的差异及两国的气象差异,本试验采用国内规范所确定的 10 min 内的最大平均风速作为平均风压计 算值.经由对数据的统计与计算,在 50 年重现期下,航站楼最不利风向角为 90°,并将航站楼前 10 个最不利 负压值列于表 1 中,由表及测点图可知在 50 年重现期下风向角为 90°时,航站楼最大负风压为-5.97 kPa,出 现在航站楼左侧边缘悬挑位置处(08-52 号测点);右侧边缘悬挑(16-42~16-44 号测点)也出现了与最 不利极值风压接近的不利风压.这也符合近几年来直立锁边结构风灾调查的结果.

最不利正压		最不利负压		
测点	压力值/kPa	测点	压力值/kPa	
43-20	2.20	08-52	-5.97	
52-01	2.20	16-43	-5.85	
07-46	2.15	16 - 44	-5.06	
43-16	2.13	08-44	-5.38	
51-56	2.08	16-36	-5.15	
50 - 05	2.01	08-51	-5.10	

表1 屋面测点最不利负压值

## 3 动态抗风揭试验概况

#### 3.1 试验装置及设计

本次试验在中冶检测维护实验室展开,加载装置由封闭压力箱、风机管道和离心风机组成,可以满足 本次试验的要求.本次试验共设计了6组屋面试件,试件基本参数见表2.试验设计参数为檩条间距、抗风 夹数量和屋面布置.试件的安装程序:先将檩条安装在试验台上,再铺好薄膜(在铺设薄膜的过程中确保檩 条中间薄膜的松弛余量),然后将固定支座装在檩条上,最后将屋面板依次安装至试验台上.

工况	檩条间距/mm	有无抗风夹	是否带天沟	动态荷载目标值/kPa
TZ-1	1 000	无	无	-4.9
TZ-2	900	无	无	-4.9
TZ-3	750	有	无	-5.9
TZ-4	750	有	有	-5.9
TZ-5	600	有	无	-8.8
TZ-6	600	有	有	-8.8

表 2 屋面参数

#### 3.2 试验材料

钢材作为一种弹塑性材料,性能优越,可加工性强<sup>[23-25]</sup>,十分适合作为金属屋面的面材.本次试验的直 立锁边金属屋面采用的是镀锌铝钢板,屈服强度≥380 MPa;每片屋面板有效宽度为420 mm,有效高度为 92 mm,屋面板厚度为0.8 mm.固定支座采用铝合金挤压成型专用固定支座.对每个 T 型支座固定支座用 4 颗 204 不锈钢加合金钻头复合自攻螺钉. 檩条采用镀锌方管.

## 4 动态试验结果及破坏现象

#### 4.1 试件 TZ-1 试验现象

试件 TZ-1 抗风压设计值为 4.9 kPa,以此作为初始荷载值进行动态抗风揭试验.加压过程中,屋面板 鼓起,经历 5 000 次动态循环加载后,锁边处未出现脱扣破坏,屋面板未出现永久变形满足设计要求.随后 将初始荷载值以 0.7 kPa 作为压力梯度进行增加,在向 6.3 kPa 加压过程中,当压力达到 5.8 kPa 时屋面 板与 T 型码处锁缝脱扣,屋面板发生破坏试验结束.

### 4.2 试件 TZ-2 试验现象

试件 TZ-2 试件抗压设计值为 4.9 kPa,以此作为初始荷载值进行动态抗风揭试验.相比于上一试件, TZ-2 试件檩条间距更小,因此顺利通过了动态抗风揭试验,设计满足使用需求.随后增加初始压力进行试 验,在向 6.3 kPa 加压的过程中,当压力值达到 5.9 kPa 时,屋面板出现脱扣破坏.



图 6 TZ-1 在 5.8 kPa 风压作用下破坏



图 7 TZ-2 在 5.9 kPa 风压作用下破坏

#### 4.3 试件 TZ-3 试验现象

试件 TZ-3 相比于上两个试件檩条间距更小且增设了抗风夹.其设计抗压值为-5.9 kPa,以此作为初始荷载值进行动态抗风揭试验.在加载过程中,屋面隆起,锁边部位与抗风夹未失效;卸载后,屋面无永久变形,满足设计使用需求.随后增加初始荷载值继续试验,当增加压力值达到 8.4 kPa 时,屋面板出现撕裂破坏,屋面失效.

## 4.4 试件 TZ-4、TZ-5 和 TZ-6 试验现象

试件 TZ-4 相比于 TZ-3,由于有天沟的存在,屋面板长度更短.其设计抗压值为 5.9 kPa,以此作为初始荷载值进行动态抗风揭试验.加载过程中未出现屋面板撕裂或咬合处脱扣,卸载后屋面板未出现不可恢

复变形,满足设计需求.

试件 TZ-5 和 TZ-6 相比于 TZ-3 和 TZ-4, 屋面支座 间距与抗风夹间距更小, TZ-5 相比于 TZ-2, 单个屋面板 长度更短. 两试件设计抗风压值均为 8.8 kPa, 以此作为 初始荷载值进行动态抗风压试验. 加载过程中, 两试件均 未出现屋面板撕裂或咬合处脱扣, 卸载后屋面板均未出 现不可恢复变形,满足设计要求.

随后增大初始荷载对 TZ-4,TZ-5 和 TZ-6 继续进行 试验. 当压力值达到 11.2 kPa 时,3 个式样均未出现屋 面板撕裂或咬合处脱扣. 随后达到仪器最大风荷载加载



图 8 TZ-3 发生撕裂破坏

值,停止实验.卸载后屋面板均未出现撕裂及不可恢复变形,咬合处未见脱扣.

#### 4.5 试验结果分析

针对乌鲁木齐机场直立锁边屋面进行了动态抗风揭试验,通过设置不同的檩条间距、不同的夹具数量 与屋面板长度来测试屋面的动态抗风揭能力.试件 TZ-1 与 TZ-2 试件屋面均未铺设抗风夹,其主要破坏形 式是屋面板与支座咬合处在动态风荷载作用下出现脱扣,随后屋面板被大范围地掀起.虽然 TZ-2 相比 TZ-1 檩条间距更小,但最终的极限承载能力接近,增加支座数量对提升动态抗风承载能力贡献较小;就破坏 形式来说,TZ-1 屋面板出现大范围失效,TZ-2 局部出现脱扣,更多的支座可以一定程度上防止屋面出现 大面积脱扣破坏.

TZ-3 与TZ-4相比,其差别在于由于有天沟的存在,两屋面板长度不同.TZ-3 屋面长度为7.73m,最终的破坏荷载为8.4 kPa,破坏形式为屋面板与抗风夹接触位置出现撕裂破坏;TZ-4 屋面板长度3.16m,最终加载至设备极限荷载值11.2 kPa时也未出现破坏.相比于未铺设抗风夹屋面出现脱扣破坏,当屋面增设抗风夹具,咬合处的承载能力大大加强,屋面破坏的控制因素由咬合处强度转变为屋面板强度;屋面板与抗风夹接触位置由于风荷载的循环作用,导致接触位置的应力远大于板面其余位置,同时由于循环作用导致屋面疲劳损伤的累积将会导致屋面板强度下降从而导致屋面板与抗风夹接触位置产生撕裂破坏.TZ-4 与TZ-3 屋面布置虽然相同,但是屋面板长度不同,这导致在同样的风荷载循环下,屋面板的拱起高度更小,抗风夹与屋面的接触应力更小,疲劳损伤累计更少,从而承载能力更强.TZ-5 相比TZ-3,屋面板长度相同,但屋面抗风夹具数量更多,同等荷载条件下,屋面板与抗风夹接触位置的应力更小,从而提升了屋面板的承载能力.

## 5 结论

针对乌鲁木齐北区扩建工程直立锁边屋面进行了动态抗风揭试验,得到如下结论.

1) 在动态加载下,增加檩条间距并不能显著的增强屋面的承载能力,但檩条增多可以一定程度上防止 屋面出现"多米诺骨牌式"的大面积风揭破坏.

2)未铺设抗风夹的屋面在动态荷载作用下出现脱扣破坏;铺设抗风夹屋面在动态荷载作用下出现屋面板与抗风夹接触位置的撕裂破坏.动态循环作用下,屋面板由于抗风夹与屋面板接触位置的应力较大,且屋面板由于循环作用出现材料疲劳损伤导致强度下降,将导致抗风夹与屋面板接触位置成为薄弱点.

3)同样的屋面布置下,长度更短的屋面承载能力更强.这是由于在同样大小循环荷载作用下,屋面跨中的隆起更小,屋面的疲劳损伤累积更小,屋面板的强度降低更小,从而承载能力更高.

4)增加抗风夹的数量可以提升屋面的动态承载能力.在同样的屋面长度与循环风荷载作用的条件下, 虽然屋面板的损伤较为接近,但更多的抗风夹会导致抗风夹与屋面板的接触位置的应力更小,从而变相提 升屋面板的承载能力.

## 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] 黄宏,方旭,陈杰,等.昌北机场直立锁边金属屋面板抗风揭试验研究[J].工业建筑,2021,51(3):110-114.
- [3] 于敬海,赵彧洋,蒋智宇,等.直立锁边金属屋面系统关键连接节点抗拉承载力试验 [J].建筑科学与工程学报,2019, 36(1):112-119.
- [4] 韩凤清.大跨空间结构屋面风荷载数值模拟研究 [D]. 天津:天津大学, 2017.
- [5] 秦国鹏,张晓旭,孙超. 铝合金屋面系统抗风揭性能试验研究及数值分析 [J]. 工业建筑, 2016, 46(10): 169-173.
- [6] 刘军进,崔忠乾,李建辉,等. 铝镁锰直立锁边金属屋面抗风揭性能试验研究与理论分析 [J]. 建筑结构学报, 2021, 42(5): 19-31.
- [7] 陈玉. 直立锁边屋面系统抗风承载能力研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [8] KOPP G A, MORRISON M J, HENDERSON D J. Full-Scale Testing of Low-Rise, Residential Buildings with Realistic Wind Loads [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, 104-106: 25-39.
- [9] KOPP G A, MORRISON M J, GAVANSKI E, et al. "Three Little Pigs" Project: Hurricane Risk Mitigation by Integrated Wind Tunnel and Full-Scale Laboratory Tests [J]. Natural Hazards Review, 2010, 11(4): 151-161.
- [10] 沈国辉, 孙炳楠, 楼文娟. 大跨屋盖悬挑结构的风荷载分析 [J]. 空气动力学学报, 2004, 22(1): 41-46.
- [11] UEMATSU Y, MOTEKI T, HONGO T. Model of Wind Pressure Field on Circular Flat Roofs and Its Application to Load Estimation [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(6-7): 1003-1014.
- [12] 傅继阳,谢壮宁,倪振华.大跨悬挑平屋盖结构风荷载特性的试验研究 [J]. 土木工程学报,2003,36(10):7-14.
- [13] 于敬海,赵彧洋,蒋智宇,等.月牙形屋面风荷载分布规律数值模拟研究 [J]. 工业建筑, 2020, 50(5): 52-57.
- [14] 李卫平. 不同体型低矮平屋面平均风荷载的数值模拟 [D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [15] 周鹏. 大跨空间结构悬挑边风荷载优化设计研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2019.
- [16] 关靖云,李东,徐晓亮,等.近40年新疆旅游气候舒适期的时空格局及其演变研究 [J].西南大学学报(自然科学版), 2022,44(6):185-197.
- [17] 李荧. 新疆风区列车气动性能试验分析 [J]. 中国铁路, 2011(12): 1-3.
- [18] WU T, SUN Y, CAO Z G, et al. A New Recommended Load Cycle for Dynamic Wind-Resistant Test of Roof System Based on the Principle of Damage Equivalence [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 48: 103911.
- [19] 建筑结构荷载规范(GB50009-2012) [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
- [20] 黄鹏, 全涌, 顾明. TJ-2 风洞大气边界层被动模拟方法的研究 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 1999, 27(1): 126.
- [21] Wind Tunnel Studies of Buildings and Structures, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No.67, Task Committee on Wind Tunnel Testing of Buildings and Structures [M]. American Society of Civil Engineers: Aerodynamics Committee Aerospace Division, 1999.
- [22] 朱晓华,高敏杰.中美屋面系统抗风揭对比试验及结果分析 [J].中国建筑防水,2011(19):6-12,23.
- [23] 梁策,杨浴儿,乔克,等.钢材强度对预应力撑杆钢柱承载能力影响研究 [J].西南师范大学学报(自然科学版),2019, 44(4):106-111.
- [24] 杨浴儿, 孟二从, 乔克, 等. 箱形预应力撑杆钢柱整体稳定性能研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2019, 44(4): 100-105.
- [25] 张旭,袁军,侯博宇,等. 轴心受压预应力斜撑杆钢柱承载能力研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2020, 45(2): 85-92.

## 责任编辑 潘春燕