引文格式：贺一凡，赵锐，淡丹辉，等. 乌鲁木齐机场T4航站楼屋面系统风灾易损性分析[J]. 太原理工大学学报，2026，57(5)：929-936.

HE Yifan，ZHAO Rui，DAN Danhui，et al. Vulnerability analysis of wind disaster for roof system of Urumqi airport T4 terminal building[J]. Journal of Taiyuan University of Technology，2026，57(5)：929-936.

乌鲁木齐机场T4航站楼屋面系统风灾易损性分析

贺一凡[1]，赵　锐[1,2]，淡丹辉[3]，冯志良[4]

（1. 新疆大学 建筑工程学院，新疆 乌鲁木齐；2. 新疆建筑结构与抗震重点实验室，新疆 乌鲁木齐；
3. 同济大学 土木工程学院，上海；4. 成都高新未来科技城发展集团有限公司，四川 成都）

摘　要：**【目的】**直立锁边屋面系统广泛应用于各类大型公共建筑，充分了解屋面系统抗风性能及其在不同风荷载等级作用下遭受损伤的程度，对于提高结构的安全性、耐久性具有重要意义。**【方法】**以乌鲁木齐机场T4航站楼为工程背景，通过开展抗风揭试验研究直立锁边屋面系统抗风性能，基于抗风揭试验建立直立锁边屋面系统力学模型分析其风揭破坏过程，引入回归分析法开展屋面系统风灾易损性分析。**【结果】**研究结果表明：固定支座间距和有无抗风夹是影响屋面抗风性能的重要参数；增设抗风夹能极大地提高屋面系统的抗风承载能力，相比于无抗风夹屋面，铺设抗风夹的屋面承载能力提高了44.83%；航站楼屋面系统易损性曲线能够很好地反映其损伤状态，其中轻度破坏、中度破坏、重度破坏以及完全破坏对应的荷载分级分别为0～0.4、0.4～0.7、0.7～0.9和大于0.9，可为直立锁边屋面系统工程设计及实践提供参考。

关键词：航站楼；直立锁边屋面系统；抗风揭试验；回归分析法；易损性分析

中图分类号：TU391　　**文献标识码**：A

DOI：10.16355/j.tyut.1007-9432.20240572　　**文章编号**：1007-9432(2026)05-0929-08

Vulnerability Analysis of Wind Disaster for Roof System of Urumqi Airport T4 Terminal Building

HE Yifan[1], ZHAO Rui[1,2], DAN Danhui[3], FENG Zhiliang[4]

(1. *College of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang, China*;
2. *Xinjiang Key Laboratory of Building Structure and Seismic Resistance, Urumqi, Xinjiang, China*;
3. *College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai, China*; 4. *Chengdu Hi-tech Future Technology City Development Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, China*)

Abstract：**【Purposes】** Standing seam roof system is widely used in all kinds of large-scale public building, a full understanding of the wind resistance of roof system and its degree of damage under the action of different wind load levels for improving the safety and durability of the structure is of great significance. **【Methods】** Taking the T4 terminal building of Urumqi Airport as engineering background, the wind resistance performance of the standing seam roof system was studied by carrying out wind uplift tests. According to the wind uplift test, the mechanical model of the standing seam roof system was established to analyze the wind uncovering failure process. The regression analysis method

收稿日期：2024-07-15；**修回日期**：2024-11-27

基金项目：新疆建筑结构与抗震重点实验室资助（XJDX1703）

第一作者：贺一凡，硕士研究生，(E-mail)heyifan@stu.xju.edu.cn

通信作者：赵锐，博士，教授，主要从事大跨度结构健康监测理论及设计技术研究，(E-mail)zhaorui@xju.edu.cn

was introduced to analyze the wind disaster vulnerability of the roof system.【**Results**】The results show that the spacing of fixed supports and the presence or absence of anti-wind clips are important parameters affecting the wind resistance of the roof system. The addition of anti-wind clips can greatly improve the wind bearing capacity of the roof system. Specifically, compared with the roof without anti-wind clips, the roof bearing capacity of the roof with anti-wind clips is increased by 44.83%. The vulnerability curves of the roof system of the terminal building can well reflect the damage state, which is light damage, moderate damage, severe damage, and complete damage, corresponding to the load bearing gradings for 0—0.4, 0.4—0.7, 0.7—0.9, and greater than 0.9, respectively. This work can provide references for the standing seam roof system engineering design and practice.

Keywords: terminal building; standing seam roof system; wind uplift test; regression analysis; vulnerability analysis

随着我国经济飞速发展和人民生产生活需求提升,采用大跨度空间结构这一外形优美的结构形式的公共建筑层出不穷,而直立锁边金属屋面因其较好的防水性、抗腐蚀性等特性被广泛应用于此类建筑的屋面板材[1-3]。WS-66H直立锁边屋面系统比传统铝镁锰直立锁边屋面系统具有更高的抗风性能,它是通过设备将屋面板与非滑动固定支座机械咬合起来,固定支座通过螺栓安装在檩条上。由于大跨屋盖结构的跨度越来越多,部分屋面还存在悬挑结构,风荷载逐渐成为其最重要的控制荷载[4,5]。在风荷载作用下,屋面板系统会发生结构破坏或者失效,这可能给建筑物造成重大经济损失,甚至会对使用者的生命安全构成威胁[6]。风灾易损性分析设计结构抗风性能评估的重要内容,可确定结构在不同风压状况下的损伤程度,可用于屋面系统的灾前预测和灾后修复[7]。

易损性研究最初起源于地震工程,是指结构在不同荷载等级作用下,发生不同程度破坏的可能性[8]。针对不同围护结构,国内外学者开展了一系列风灾易损性研究,Ji et al[9]考虑了风向角对结构的影响,提出了一种综合性的钢屋面风灾易损性分析方法。Qin[10]和Stewart et al[11]将屋面板和桁架破坏的平均程度作为结构易损性的判定准则,考虑屋面系统连接件过载问题,开展围护结构易损性研究。赵明伟等[12]以构件破坏作为判定准则,使用蒙特卡洛模拟得到轻型钢结构风灾易损性曲线。齐晓海等[13]考虑了真实风环境,通过力学试验和数值模拟相结合的手段,对360°金属屋面系统开展风致易损性分析。孔中明等[14]考虑了雪荷载的影响,开展轻型钢结构的风灾易损性分析。上述研究主要是依据结构失效破坏状态进行,并未研究结构失效前的损伤状态。对此,李正良等[15,16]将屋面失效全过程分为三个性能水准,并基于模糊性能及多重性性能水准对360°直立锁缝屋面系统开展风灾易损性研究。孙瑛等[17,18]考虑了屋面板疲劳效应,基于屋面材料延性损伤模型,引入损伤系数作为量化指标,对铝镁锰屋面系统开展易损性研究。

新疆特殊的地形地貌造就了九大风区,乌鲁木齐邻近达坂城风区,常年遭受大风影响。本文基于新疆乌鲁木齐国际机场改扩建工程背景,建立直立锁边屋面系统力学模型,通过模拟分析其抗风机理及破坏形式,确定以大耳边卡口位移为指标,采用回归分析法得到屋面系统风灾易损性曲线,可为直立锁边屋面系统风灾易损性研究提供一定参考。

1 工程概况

乌鲁木齐国际机场改扩建工程是国家“十三五”规划重点建设项目,项目按规划建成后至2030年,乌鲁木齐国际机场年旅客吞吐量将达到6 300万人次,年货邮吞吐量可达到75万t,分别是现在的3倍和4.4倍。乌鲁木齐国际机场北区改扩建工程航站楼(以下简称“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。航站楼最高点处高度约55 m,平面横向最大宽度约835 m,纵向最大长度约762 m,属于典型的大跨度结构。航站楼鸟瞰如图1所示。

乌鲁木齐地区基本风压为0.6 kPa(50年重现期),近年来最大风速达到24.9 m/s。国际机场所在地周边较空旷,航站楼属于大跨度悬挑结构,对风荷载敏感。航站楼所有屋面均采用WS-66H直立锁边镀铝锌屋面系统,结构详图如图2所示。直立锁边屋面特殊的细部咬合构造使得其易发生因咬合承载力不足所导致的屋面板“多米诺骨牌”式风揭破坏,因此,研究航站楼的屋面系统风灾易损



图 1　航站楼鸟瞰图

Fig. 1　Aerial view of the terminal building

性对于保障人民群众的生命和财产安全以及打造“空中丝绸之路”具有重要意义。

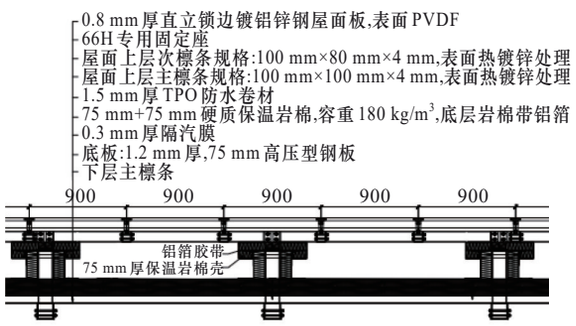


图 2　直立锁边屋面系统示意图

Fig. 2　Schematic diagram of standing seam metal roof system

2　抗风揭试验

2.1　试验概况

本次试验在中冶检测维护实验室展开，试验材料采用镀铝锌直立锁边钢屋面板，与航站楼屋面系统一致。加载装置由封闭压力箱、风机管道和离心风机组成，压力箱内充入空气，形成对屋面系统向上的推力，模拟风荷载作用时对屋面产生的吸力效果。抗风揭试验加载方案参考《钢结构工程施工质量验收标准》（GB 50205—2020）的附录 3[19]，试件加载分为两个阶段，先进行 5 000 次动态循环加载，若试件未破坏，继续开展静态分级加载直至试件破坏或者加载装置达到极限值。

抗风揭试验加载值是依据《建筑结构荷载规范》（GB 50009—2012）[20]（简称《荷载规范》）来确定。《荷载规范》中给出围护结构风荷载设计值计算公式为：

$$w_k = \beta_{gz}\mu_{sl}\mu_z\omega_0 \,. \tag{1}$$

式中：β_{gz} 为高度 z 处的阵风系数；μ_z 为风压高度变化系数；μ_{sl} 为风荷载局部体型系数；ω_0 为 10 m 高度基本风压。β_{gz} 和 μ_z 可根据规范取得，而对于外形复杂的大跨度屋面结构来说，风荷载体型系数 μ_{sl} 无法直接由规范或计算得到，且现行的基本风压 ω_0 的选取也更偏向平均风荷载，并不满足动态抗风揭试验的要求。本文依据航站楼风洞试验结果计算得到风荷载设计值，进而确定屋面系统抗风揭试验加载值。风洞试验模型为刚体模型，采用有机玻璃板和 ABS 板制成，如图 3 所示。

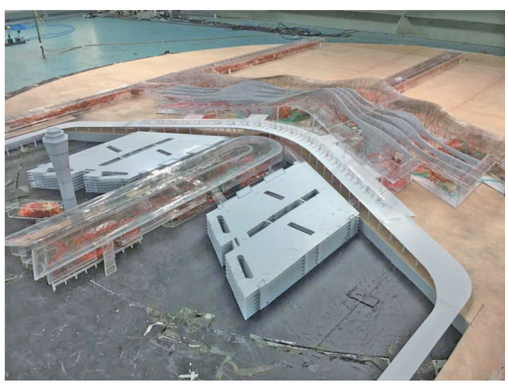


图 3　航站楼风洞试验模型

Fig. 3　Wind tunnel test model of terminal building

本次抗风揭试验选取航站楼不同区域屋面系统，共设计了 6 组屋面试件，试验设计参数为固定支座间距、有无抗风夹及屋面板长度，试件具体参数及试验加载值见表 1。

表 1　试件参数

Table 1　Parameters of specimens

试件	固定支座间距/mm	有无抗风夹	屋面板长度/m	试验加载值/kPa
TZ-1	1 000	无	7.73	−4.9
TZ-2	900	无	7.73	−4.9
TZ-3	750	有	7.73	−5.9
TZ-4	750	有	3.16	−5.9
TZ-5	600	有	7.73	−8.8
TZ-6	600	有	3.16	−8.8

2.2　试验结果及分析

针对航站楼屋面系统开展了 6 组试件的动态与静态抗风揭试验，通过设置不同固定支座间距及是否安装抗风夹来研究屋面板的抗风性能，在抗风揭试验中，6 组试件在动态循环加载阶段均未发生破坏，其中 TZ-1、TZ-2 和 TZ-3 试件在静态分级加载中发生破坏，TZ-4、TZ-5 和 TZ-6 试件在设备极限荷载值 11.2 kPa 下仍未发生破坏，试件具体破坏情况见表 2。

以试件 TZ-1 为例，在加压过程中，屋面板鼓曲，经历 5 000 次动态循环加载后，锁边处未出现破坏，屋面板未出现永久大变形，满足设计要求。随

表2 试件破坏情况

Table 2 Failure conditions of specimens

试件	破坏类型	破坏加载值/kPa
TZ-1	脱扣破坏	−5.8
TZ-2	脱扣破坏	−5.9
TZ-3	撕裂破坏	−8.4
TZ-4	未破坏	—
TZ-5	未破坏	—
TZ-6	未破坏	—

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加压的过程中，当压力达到5.8 kPa时，屋面板与固定支座锁边脱扣，屋面板发生破坏，试验结束，屋面脱扣破坏如图4所示。



图4 试件TZ-1试验破坏现象

Fig. 4 Failure phenomenon of specimen TZ-1

从抗风揭试验结果中可以发现，固定支座间距、是否带抗风夹及屋面板长度是影响屋面系统抗风性能的重要参数。屋面系统抗风承载力随着固定支座间距减小而提高，屋面板长度越短，屋面系统抗风承载力越高，增设抗风夹能够显著提高屋面系统的抗风承载能力。有无抗风夹的屋面系统破坏形式存在差别，无抗风夹的屋面系统破坏类型为脱扣破坏，带抗风夹的屋面系统破坏形式为屋面板撕裂破坏。

3 屋面系统力学模型及破坏等级划分

3.1 屋面系统有限元模型

基于ABAQUS有限元软件，建立直立锁边金属屋面系统有限元模型，参考抗风揭试验TZ-1试件参数，该模型沿纵向取四跨，跨度为1 000 mm，横向取两跨，屋面板宽度为420 mm，屋面板材料采用镀铝锌钢板，厚度为0.8 mm；固定支座采用半圆弧支座，取半圆弧内径为6.25 mm，外径为7.75 mm，高度为120 mm。本构关系采用双线性随动强化模型。屋面板采用四节点缩减积分壳单元(S4R)，固定支座采用八节点缩减积分实体单元(C3D8R)，对于部件的网格划分，对屋面板与固定支座接触处进行网格加密处理，将此处屋面板大小耳边及半圆弧固定支座部位网格尺寸取为1 mm，其余屋面板和固定支座部位网格尺寸为10 mm，屋面板与支座网格较为均匀，且无明显的尖角与扭曲，网格质量较好。有限元模型及构造细节如图5所示。

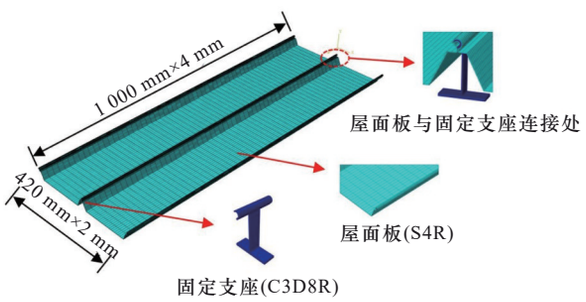


图5 有限元模型

Fig. 5 Finite element model

约束及荷载设置是否正确将会极大地影响模拟结果的准确性，因此对于约束及荷载的设置应尽可能贴近实际工程。对于半圆弧固定支座而言，支座通过螺栓固定在屋面次檩条上，且在加载过程中无螺栓拉拔破坏或支座破坏，因此在有限元模型中将固定支座下部耦合到固定节点并施加固结约束。屋面板咬合面处设置摩擦接触。屋面板的两侧在抗风揭试验加载过程中通过支架压紧，因此限制3向自由度，两跨屋面板的两侧耳边，认为其在荷载作用下未出现破坏，此时屋面耳边受到支座咬合限制同样约束3向自由度，约束如图6所示。对于循环风荷载作用，由于实际试验加载周期较长，已有研究提出了等效荷载循环加载序列用以节省数值模拟时间，该序列将低比例的循环加载等效为几组高比例的循环加载[21]。

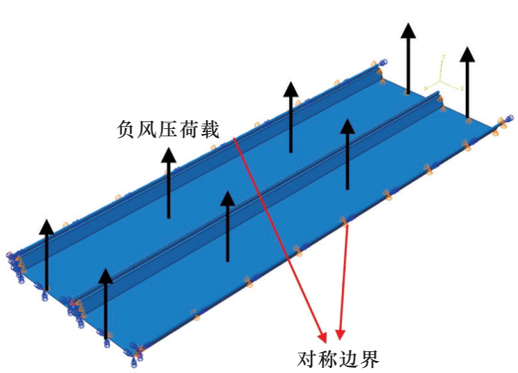


图6 荷载及边界条件

Fig. 6 Load and boundary conditions

通过有限元分析，直立锁边金属屋面系统破坏模式如图7所示。随着风荷载值逐渐增大，直立锁

边金属屋面系统中屋面板与固定支座之间的卡口位移值也逐渐增大，最终屋面板会脱离固定支座，此时发生脱扣破坏。同抗风揭试验 TZ-1 试件破坏情况对比来看，本文有限元模拟能较好地模拟试验中的破坏过程，可用于后续分析。

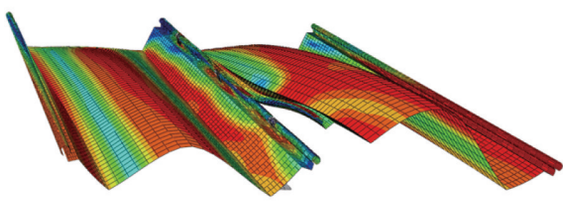


图 7　有限元模拟结果

Fig. 7　Finite element simulation result

3.2　直立锁边屋面系统破坏等级划分

确定合理的破坏等级并准确地给出对应于不同破坏等级的量化标准是开展直立锁边金属屋面系统风灾易损性分析的关键。因此，本节基于有限元模拟分析结果，首先对直立锁边金属屋面系统破坏等级定性划分，随后定量确定破坏等级对应的量化指标。

3.2.1　有限元模拟结果

本文模拟结果与试验结果表明，对于无抗风夹屋面来说，外侧大耳边的横向卡口位移是衡量屋面板是否破坏的决定性因素。目前针对动态荷载作用下的屋面抗风承载能力（即卡口位移）与屋面参数之间的关系并不明确，因此有必要针对不同的试件参数进行细化研究，模拟工况见表 3。

表 3　模拟工况

Table 3　Simulation conditions

工况	屋面厚度/mm	屋面板宽度/mm	固定支座间距/mm
1	0.9	420	1 000
2	1.0	420	1 000
3	0.8	420	750
4	0.8	420	600

参考抗风揭试验结果，本次模拟以 5.8 kPa 作为循环序列的加载幅值。将屋面的极限风荷载分为 10 级，逐级进行模拟加载，以大耳边卡口位移作为屋面结构破坏控制指标，得到不同工况下各个风压梯度下的大耳边卡口位移值，如图 8 所示。

3.2.2　有限元模拟结果

对于无抗风夹直立锁边屋面来说，风荷载作用下大耳边卡口处位移是屋面破坏的控制因素，其位移受到两方面因素影响，一方面是屋面板在风荷载作用下将会出现变形，另一方面是卡口处在风荷载

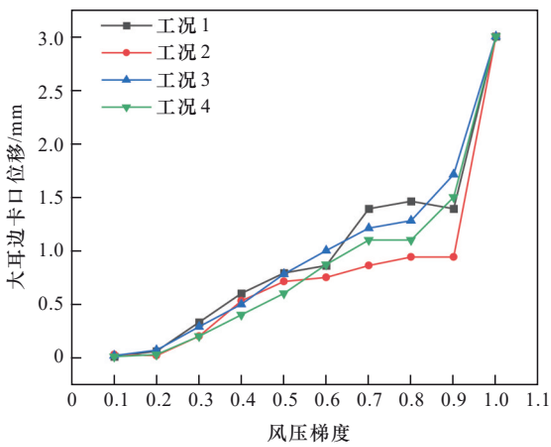


图 8　不同风压梯度下各屋面大耳边卡口位移

Fig. 8　Displacements of the large ear edge of roofs with different wind pressure gradients

作用下的转动。基于此，分析上一小节确定的屋面系统卡口位移，可以发现：在第一阶段，卡口处位移几乎为 0，此时屋面受到的荷载较小，屋面变形较小，从而卡口处的位移基本为 0；进入第二阶段，荷载持续增大，屋面变形持续增大，开始带动大耳边卡口处随着屋面变形而变形；当荷载达到破坏的 70% 时，屋面变形持续发展，大小耳边接触面的机械咬合力大于风荷载，屋面咬合限制了卡口的位移，此时卡口扭转受到咬合处的约束从而进入平台期；当荷载继续增大接近破坏荷载时，大小耳边接触面的机械咬合力小于风荷载，咬合失效，卡口开始扭转，随后发生脱扣破坏。屋面的破坏程度可由大耳边卡口位移分为四种程度，如图 9 所示。

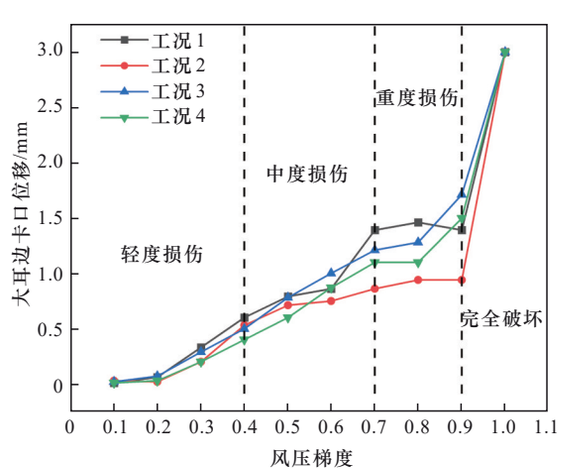


图 9　屋面破坏等级划分

Fig. 9　Roof system damage classifications

轻度损伤（风压梯度 0～0.4）：屋面无损伤，风荷载作用下屋面整体处于弹性，屋面基本完好。中度损伤（风压梯度 0.4～0.7）：屋面发生中等程度的损伤，此阶段屋面的弹性变形可以自主恢复，但屋面的部分接触面机械咬合失效，此时屋面部分卡口

出现扭转，失效的咬合力无法恢复，需要再次锁边方可继续使用。重度损伤（风压梯度0.7～0.9）：屋面发生重度损伤，此阶段屋面大小耳边接触位置将会出现大面积的咬合失效，屋面板变形较大；完全破坏（风压梯度0.9～1.0）：屋面发生完全破坏，荷载接近或超过破坏荷载，大小耳边接触位置咬合完全失效，屋面扭转，随后出现脱扣破坏，屋面大耳边被掀起。屋面破坏程度分级见表4。

表4 屋面系统破坏程度分级

Table 4 Roof system damage degree classifications

破坏等级	损伤指标	破坏现象	修复措施
轻度损伤	0～0.4	屋面基本处于弹性，卡口无明显位移	屋面健康状况良好
中度损伤	0.4～0.7	屋面部分位置出现塑性变形，卡口有明显位移，屋面出现漏水	需要针对卡口或部分出现塑性的屋面板进行修理加强
重度损伤	0.7～0.9	屋面大面积进入塑性阶段，屋面板扭曲变形并出现漏水，屋面板有积水情况	屋面系统需要进行局部屋面板的加强或替换才可继续使用
完全破坏	0.9～1.0	卡口扭转失效，发生脱扣破坏	需要直接拆除屋面板更换新的屋面板后才可继续使用

4 屋面系统风灾易损性分析

屋面受到大风作用在一定程度上和结构受到地震作用有一定的相似性：风荷载与地震波均是一个随机过程，因此借鉴地震工程中基于性能水平的结构性能分级方法，性能分级是一个很好的衡量屋面破坏程度的量化指标。本文采用地震易损性研究中的回归分析法进行风灾易损性分析。

首先定义屋面破坏参数β，将屋面结构控制响应归一化：

$$\beta=\frac{\alpha_i}{\alpha_0}. \tag{2}$$

式中：β为屋面破坏参数，α_i为第i级风压作用下的屋面结构控制响应，α_0为破坏时屋面的结构响应。

随后计算基于不同性能指标下的屋面破坏参数比值k：

$$k=\frac{\beta}{\beta_n}. \tag{3}$$

式中：k为屋面破坏参数比值，β为样本的破坏参数，由公式（2）计算得到，β_n为不同性能水准的破坏参数下限值，见表4。

随后建立破坏参数比值k与屋面风压梯度M之间的对数关系：

$$\ln k=a\ln M+b. \tag{4}$$

由上式可以得到不同风压梯度下一系列离散的点，将离散的点进行最小二乘法拟合，由拟合结果得到不同破坏等级下的拟合方程的标准差σ，而直立锁边屋面的易损性概率表达式为：

$$P=P(\beta\geqslant\beta_n|M=m)=\Phi\left(\frac{\ln k}{\sigma}\right). \tag{5}$$

依据上述介绍过程，选择m=0.4作为屋面中度损伤的性能指标，m=0.7作为结构重度损伤的性能指标，m=0.9作为结构破坏时的性能指标。根据图8中不同屋面参数在各级风压梯度下的大耳边卡口位移数据，使用式（3）计算不同破坏程度下的屋面破坏参数k，如表5所示。

表5 不同破坏等级下屋面系统破坏参数比值

Table 5 Ratios of failure parameters of roof system under different failure levels

(a) 中度损伤下屋面系统破坏参数比值

工况	风压梯度								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
1	0.01	0.05	0.50	1.40	1.90	2.00	2.3	2.50	2.50
2	0.03	0.10	0.42	0.72	1.14	1.46	1.77	1.88	2.50
3	0.01	0.02	0.60	1.07	1.43	1.55	2.50	2.62	2.50
4	0.02	0.04	0.33	0.67	1.00	1.44	1.78	1.80	2.50

(b) 重度损伤下屋面系统破坏参数比值

工况	风压梯度								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
1	0.19	0.34	0.36	0.90	1.10	1.13	1.24	1.21	1.05
2	0.02	0.08	0.35	0.61	0.96	1.22	1.48	1.70	1.05
3	0.01	0.03	0.38	0.65	0.86	0.93	1.49	1.63	1.05
4	0.03	0.04	0.27	0.50	0.70	0.99	1.21	1.56	1.05

(c)完全破坏下屋面系统破坏参数比值

工况	风压梯度								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
1	0.01	0.03	0.27	0.76	1.04	1.10	1.26	1.37	1.37
2	0.02	0.05	0.22	0.40	0.63	0.80	0.97	1.03	1.37
3	0.00	0.01	0.32	0.58	0.78	0.85	1.36	1.43	1.37
4	0.01	0.02	0.18	0.37	0.54	0.80	0.97	0.99	1.37

根据表5中的数据，以破坏参数比值k取对数$\ln k$为纵坐标，风压梯度M取对数$\ln M$为横坐标，依据式（4）进行最小二乘法的线性回归，结果如图10所示。中度损坏、重度损坏和完全损坏三种性能水平下屋面的$\ln k$与$\ln M$直线拟合程度良好，R^2分别为0.94、0.95以及0.97，对应的标准差σ均为0.118 5。

将上述结果代入式（5）即可得到屋面在三种性能水平下的屋面易损性曲线，绘制无抗风夹屋面易损性曲线如图11所示。

由屋面系统易损性曲线可以看出，对于直立锁

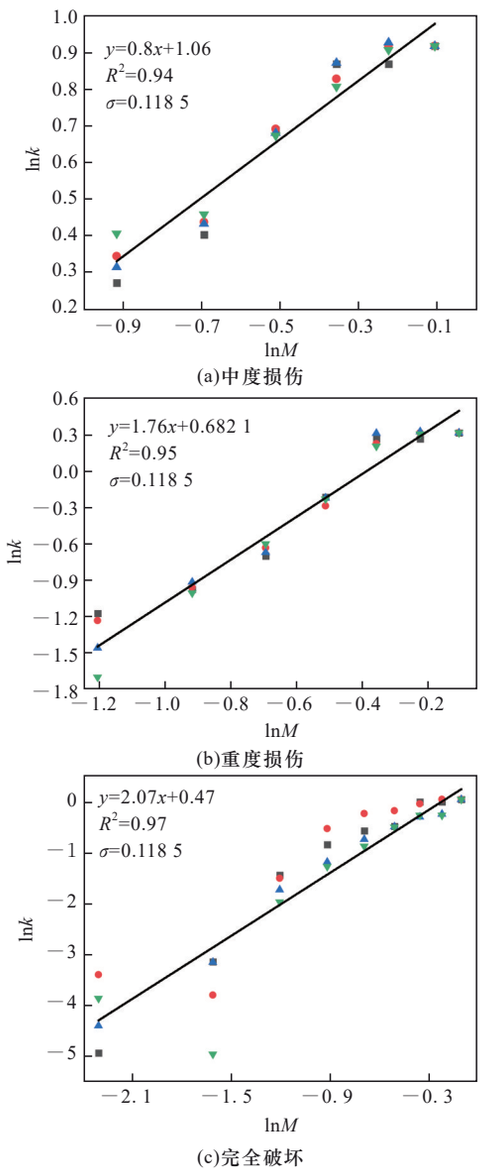


图 10　不同破坏等级线性回归分析

Fig. 10　Linear regression analyses of different damage levels

边屋面系统，当荷载小于屋面极限荷载的 35% 时，屋面将基本处于完好状态；当荷载超过极限荷载的 50% 时，屋面将发生中等程度的损伤，此时屋面由于施工质量导致存在空隙的外侧大耳边屋面将会有明显的转动；当荷载超过极限荷载的 70% 时，屋面将会发生严重的损坏，此时屋面将会有明显的变形和缝隙，需要进一步修理才可继续使用；当荷载

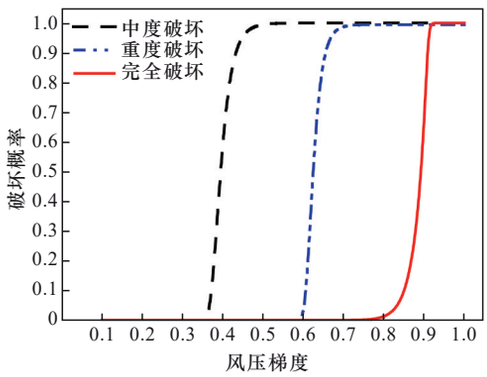


图 11　屋面系统易损性曲线

Fig. 11　Vulnerability curves of roof system

超过极限荷载的 95% 时，屋面将会发生大耳边的脱扣破坏，屋面板被掀起，屋面此时受到较为严重的损伤，需要大面积更换屋面板才可保证屋面系统正常使用。

5　结论

本文基于乌鲁木齐机场 T4 航站楼工程项目，开展了航站楼金属屋面系统抗风揭试验，并进一步通过引用回归分析法，结合数值模拟得到了屋面系统风灾易损性曲线，主要结论如下：

1）无抗风夹屋面和带抗风夹屋面的破坏形式有差异，无抗风夹屋面在动态风荷载作用下发生脱扣破坏，有抗风夹屋面发生撕裂破坏。

2）铺设抗风夹可以极大地提高屋面的抗风承载能力，相比于无抗风夹屋面，铺设抗风夹的屋面承载能力提高了 44.83%，铺设抗风夹是提高屋面承载能力的较为简单经济的做法。

3）将屋面状态按荷载等级分为四类，当荷载小于极限荷载 40% 时为基本安全，处于极限荷载 40%～70% 时为屋面中度破坏，处于极限荷载 70%～90% 时为屋面重度破坏，大于极限荷载 90% 时屋面完全破坏。

4）采用回归分析法计算得到了直立锁边屋面系统易损性曲线，可以为屋面设计提供借鉴，且根据建筑物不同的性能使用需求，可选择不同的易损性曲线。

参考文献：

[1]　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.

[2]　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.

[3]　吴小蕙，王彦峰，李嘉杰，等．温度作用下直立锁边铝合金屋面系统力学性能试验研究[J]．建筑结构，2023，53(24)：48-53+42.

[4]　Wang C，Li Z，Wang T，et al. Wind uplift fragility assessment method of 360° standing seam roof system and its application in

wind damage estimation of UHV converter station [J].Journal of Structural Engineering,2023,149(5):04023031.
[5] 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,2024,54(6):141-147.
[6] Lu Q,Li M,Zhang M,et al.Wind-resistance performance investigation of 360° vertical seam-locked roof system reinforced by sliding support and sandwich panel[J].Journal of Building Engineering,2022,45:103689.
[7] 王成.直立锁缝屋面系统风致响应及概率评估方法研究[D].重庆:重庆大学,2022.
[8] 武涛.直立锁边金属屋面板风揭破坏机理与风灾易损性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022.
[9] Ji X,Huang G,Zhang X,et al.Vulnerability analysis of steel roofing cladding:Influence of wind directionality[J].Engineering Structures,2018,156:587-597.
[10] Qin H,Stewart M.System fragility analysis of roof cladding and trusses for Australian contemporary housing subjected to wind uplift[J].Structural Safety,2019,79:80-93.
[11] Stewart M,Ginger J,Henderson D,et al.Fragility and climate impact assessment of contemporary housing roof sheeting failure due to extreme wind[J].Engineering Structures,2018,171:464-475.
[12] 赵明伟,顾明.轻型钢结构风灾易损性概率分析[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(9):3609-3618.
[13] 齐晓海,冀骁文,王斐亮,等.360°咬合金属板屋面风致易损性分析[J].建筑结构,2024,54(10):81-86,144.
[14] 孔中明.轻型钢结构厂房考虑雪荷载的风振响应及风灾易损性分析[D].苏州:苏州科技大学,2019.
[15] 李正良,胡俊杰,王涛.基于模糊性能水准的直立锁缝屋面系统风灾易损性分析[J].工程力学,2024,41(10):180-190.
[16] 李正良,王成,王涛.基于多重性能水准的直立锁缝屋面系统风灾易损性分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2023,50(3):164-174.
[17] Su Y,Wu T,Cao Z.Wind vulnerability analysis of standing seam roof system with consideration of multistage performance levels[J].Thin-Walled Structures,2021,165:107942.
[18] Wu T,Su Y,Cao Z,et al.Wind vulnerability analysis of standing seam roof system considering fatigue damage[J].Thin-Walled Structures,2023,184:110550.
[19] GB 50205—2020钢结构工程施工质量验收标准[S].
[20] GB 50009—2012建筑结构荷载规范[S].
[21] Wu T,Su Y,Cao Z,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.

(编辑:杨 鹏)