

引用格式: 聂立功, 高峰, 刘伯奇, 等. 直立锁缝铝合金屋面系统日照温度场研究[J]. 工业建筑, 2026, 56(4): 42-50. NIE Ligong, GAO Feng, LIU Boqi, et al. Analysis of Temperature Field of Vertical Lock Joint Metal Roofing System[J]. Industrial Construction, 2026, 56(4): 42-50 (in Chinese). DOI: 10.3724/j.gyzG23101614

直立锁缝铝合金屋面系统日照温度场研究^{*}

聂立功¹ 高峰² 刘伯奇³ 张浩⁴ 王书鹏⁴ 肖煜⁴

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院, 石家庄 050043; 2. 中国铁路广州局集团有限公司站房建设指挥部, 广州 510000; 3. 中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究院, 北京 100081; 4. 石家庄铁道大学安全工程与应急管理学院, 石家庄 050043)

摘 要 日照作用下太阳辐射对大跨度金属屋面系统的温度效应非常显著。以直立锁缝铝合金屋面为对象, 研究其屋面板的温度场及其变化规律。考虑了不同水平倾角和面板朝向对屋面板温度的影响, 利用 ANSYS 热分析模块对直立锁缝屋面系统的屋面板建立有限元模型, 考虑空气对流换热、环境长波辐射换热、太阳辐射等因素的影响, 分析了屋面各个位置在太阳照射下的温度分布规律, 同时开展试验验证数值仿真结果, 详细分析了自然环境条件下屋面板的温度场和变化规律, 试验结果验证了仿真方法的可行性。结果表明: 铝合金屋面板是热敏构件, 在日照作用下极短时间内快速升温, 无太阳辐射时屋面温度快速下降, 故太阳直接辐射是温度升高的主要影响因素; 同一时刻屋面板温度场趋于一致, 分布较为均匀; 屋面板最高温度达 66.93℃, 与环境温差最大达 32.93℃, 且在实际大跨度铝合金屋面系统中, 这种差距会更加明显。

关键词 数值仿真; 温度场; 太阳辐射; 金属屋面板

Analysis of Temperature Field of Vertical Lock Joint Metal Roofing System

NIE Ligong¹ GAO Feng² LIU Boqi³ ZHANG Hao⁴ WANG Shupeng⁴ XIAO Yu⁴

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. Station Building Construction Headquarters, China Railway Guangzhou Group Co., Ltd., Guangzhou 510000, China; 3. Railway Architecture Research Institute of China Academy of Railway Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100081, China; 4. School of Safety Engineering and Emergency Management, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The temperature effect of solar radiation on a large-span metal roofing system under insolation is very significant. In this paper, the temperature field of the roof panel and its changing law were studied by taking a vertical locking seam aluminium alloy roof as the object. Considering the influence of different horizontal inclination angles and panel orientation on the temperature of the roof panel, ANSYS thermal analysis module was used for upright lock seam roof system roof panel to establish a finite element model considering the air convection heat transfer, ambient long-wave radiation heat transfer, solar radiation and other factors, analysed the roof of the various positions in the solar irradiation of the temperature distribution law. At the same time, to carry out tests to verify the results of numerical simulation, according to the test results, a detailed analysis of the temperature field and the change rule of the roof panel under natural environmental conditions, the test results verify the feasibility of the simulation method. The results show that the aluminium alloy roof panel is a heat-sensitive component, in the sunshine under the action of a very short period of time rapid warming, no solar radiation when the

^{*} 高速铁路轨道技术国家重点实验室开放基金项目(2022YJ104-1)。

第一作者: 聂立功, 硕士研究生, 主要从事大型结构健康监测。

电子信箱: 1823311501@qq.com

收稿日期: 2023-10-16

roof temperature drops rapidly, the sun direct radiation is the main influence of the temperature rise, the same moment the roof temperature field tends to be consistent distribution is more uniform. The maximum temperature of the roof panel reaches $66.93\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the temperature difference with the environment reaches $33.93\text{ }^{\circ}\text{C}$. It will be more obvious in the actual large-span aluminium alloy roofing system.

Keywords: numerical simulation; temperature field; solar radiation; metal roof panels

0 引言

金属屋面系统能够灵活适应各种不规则、姿态奇异的复杂建筑及铁路站房,已经被广泛地用作铁路站房、大型体育场馆等大跨度结构的围护结构。目前,以直立锁边和直立锁缝金属屋面系统应用较为广泛^[1],但金属屋面系统在施工和使用过程中仍面临着温度应力、风揭破坏、屋面渗漏、火灾隐患、檩条松动、拉杆掉落等“病害”问题。目前,对道路桥梁^[2-4]、水库大坝^[5]、太阳射电望远镜^[6-7]、路面^[8]等大跨度结构的热效应研究较多,而对于大跨金属屋面温度问题研究较少。在进行金属屋面设计时,普遍不考虑温度导致的温度效应对屋面系统各个组成构件力学性能的影响,且对结构温度效应的分析基本都是定性分析或简单的定量分析计算,结构设计往往不够经济合理,缺乏准确的温度效应定量计算^[9]。

大跨钢结构由于其尺寸较大,约束条件较复杂,温度应力难以释放,温度效应所带来的问题十分复杂。对于铁路车站、大型体育场馆、机场航站楼等大跨结构,金属屋面系统由于太阳辐射所带来的温度效应,对于屋面系统可能存在危害,同时由于一般的大跨结构屋面系统室内与室外存在温差,尤其在夏季和冬季屋面系统内外温差更甚,巨大温差的存在对于金属屋面本身以及屋面与主体结构之间的支座力学性能的影响尚不明确。温度是一个循环作用的荷载,长期存在温差一定会引起屋面与主体结构连接支座松动、檩条脱落等“结构病害”,因此对于金属屋面的温度场分布研究迫在眉睫。然而,屋面结构的温度场分布存在诸多影响因素:1)非理想天气下的日气温变化;2)受气象信息与地理信息影响的太阳辐射量;3)屋面在复杂环境下的实际吸热能力与散热能力。由日气温变化模型计算太阳辐射量的模型,一般有两种计算方法^[10]:1)计算瞬时的太阳辐射;2)计算时段内的太阳辐射总量。众多学者也据此总结并编制了温度场数值模拟程序^[11-12],结合实际进行了有限元建模,

并提出了精确的模拟方法^[13],还对影响结构温度场的各种因素展开了细致研究^[14-15],结果表明:太阳强烈辐射作用下,夏季钢构件的最高温度可超过 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度应力与结构尺寸、约束情况等因素相关。

王明明等^[16]通过试验研究了温度场作用下直立锁边铝合金屋面系统的变形和应力分布规律。王彦峰等^[17]通过温度试验研究了有无抗风夹对直立锁边屋面系统温度效应的影响。任建等^[18]在温度循环作用下研究了连续焊接不锈钢金属屋面系统工作性能和理论分析。仇子文等^[19]以青岛胶东国际机场航站楼连续焊接不锈钢屋面为例,通过试验研究环境温度对屋面系统的静动力影响分析。Singh等^[20]利用三维热分析软件HEAT3分析研究无任何钢紧固件和有钢紧固件两种情况下屋面组件传递热量的差异。Wang等^[21]研究考虑了不同表面粗糙度、水平倾角和空间位置条件下,单块不锈钢屋面板和连续焊接不锈钢屋面板的温度场及其变化规律。

铝镁锰合金直立锁缝屋面当前应用广泛,然而其温度分布规律未见系统研究。本文以直立锁缝屋面系统4个试件为研究对象,考虑了不同水平倾角和空间位置对屋面板温度的影响,对屋面结构板面和板肋位置进行实测,结合实测结果对基于地理气象信息的温度场分析算法进行了参数修正,得到了准确的结构瞬态温度场的模拟方法与模拟结果,同时研究了直立锁缝屋面温度场分布规律。

1 非均匀温度场模拟方法

1.1 热传递方式

日照温度场包括热传导、热对流及热辐射三种热传递方式。1)热传导:结构各自不同部分由于温度梯度而引起的内能交换;2)热对流:固体表面与周围接触的空气之间由于温差引起的热量交换;3)热辐射:物体发射电磁能并被其他物体吸收转变为热的能量交换过程。物体温度越高,单位时间辐射的热量越多,且无需任何介质。这三种方式中的

后两种以外荷载的形式施加于结构之上,而第一种方式属于结构内部的传导。两种外荷载的具体计算过程见图1。

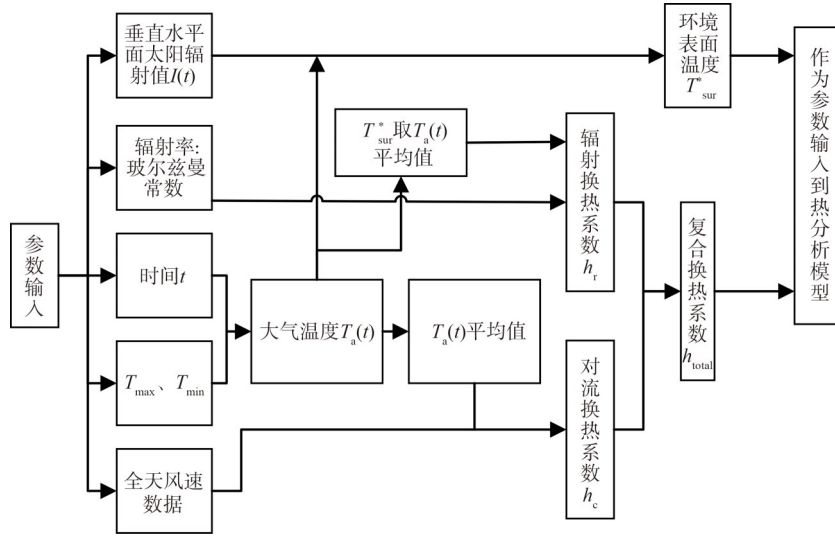


图1 对流换热与环境长波辐射的计算流程

Fig. 1 Calculation process of convective heat transfer and ambient longwave radiation

1.1.1 对流换热

在有限元分析时,复合换热表面对流系数 $h_{total} = h_c + h_r$,它综合考虑了结构表面与空气对流换热和结构与周围环境之间的长波辐射换热。设置其作为有限元模型中对流单元的实常数,对流单元的环境温度节点的温度按式(1)进行计算。

$$T_{sur}^* = T_a + \frac{\rho I}{q_s} \times \frac{h_r}{h_r + h_c} \quad (1)$$

式中: ρ 为质量密度; I 为辐射强度; q_s 为表面热流密度;其他物理含义见图1。

1.1.2 热辐射

根据热分析理论可将太阳到地球大气层的太阳辐射分为三部分:1)太阳直接辐射,即太阳辐射直接到达地面的能量,占太阳辐射总量的比例最高;2)散射辐射,即太阳辐射到达地球后,经大气散射与吸收后到达地面的能量,所占比例较小;3)地面反射,即到达地表的能量又有部分被反射到大气中。整体太阳辐射情况如图2所示。

1)直接太阳辐射值 I_d 按照式(2)计算。

$$I_d = n_s \times 0.90^{mp} I_0 \left(1 + 0.033 \cos \frac{360^\circ N}{365} \right) \cos \theta \quad (2)$$

式中: θ 为太阳光线入射方向(由地理纬度和一天中的时间计算得出)与倾斜杆件或者倾斜表面法线的夹角; N 为从元旦起算的日序数; p 为大气浑浊度因子,晴空洁净大气情况时其变化范围为1.8~3.3,

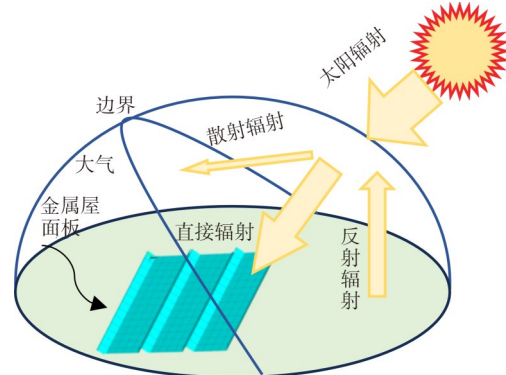


图2 太阳辐射示意

Fig. 2 Schematic diagram of the solar radiation

夏季取偏低值,冬季取偏高值; m 为经气压修正的大气光学质量,由海拔高度和太阳光线与水平面的夹角计算可得; n_s 为表面对太阳辐射的吸收率,主要与颜色和表面状况有关,表面颜色越深、越粗糙,吸收率越大,综合考虑试验所处的地理环境以及试件表面油漆颜色以及粗糙程度,本文取0.5; I_0 为太阳常数,我国取 1367 W/m^2 。

2)散射太阳辐射值 I_s 按照式(3)计算。

$$I_s = n_s \times I_{sh} \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (3)$$

式中: I_{sh} 为水平面上的天空散射辐射强度,由直接太阳辐射和太阳光线与水平面的夹角计算得出; α 为倾斜构件与水平面的夹角。

3)地面反射太阳辐射值 I_r 按照式(4)计算。

$$I_t = n_s (I_0 + I_s) R_s \frac{1 - \cos \alpha}{2} \quad (4)$$

式中: R_s 为地表反射率, 一般近似取 0.2。

根据上述计算公式, 可以计算试验日一天的太阳

辐射量, 从而将太阳热流率作为荷载施加在有限元模型中, 进行直立锁缝屋面温度场分析。同时根据热力学理论及太阳辐射的计算公式, 图3给出了一天太阳自东向西运动过程中太阳辐射的计算流程。

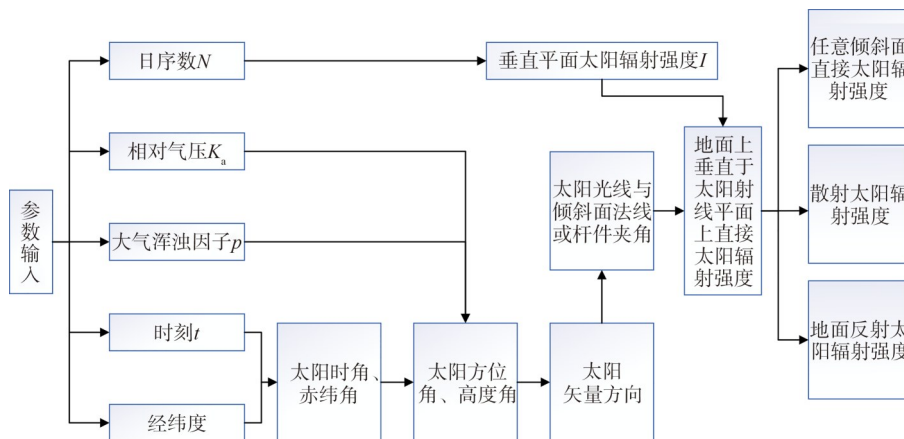


图3 太阳热辐射计算流程

Fig. 3 Calculation process of solar heat radiation

1.2 温度场初始条件

对于结构而言, 初始计算时刻的温度场可以作为初始条件, 而这个初始条件是未知的。由于凌晨时刻结构各部分温度趋于均匀一致, 但考虑到钢构件是热敏构件及试验组件所处地理位置, 在 8:00 前被测组件一直处于遮挡状态, 因此选定 8:00 的大气温度作为结构的初始温度来进行后续计算分析。

2 日照屋面温度场计算模型

2.1 温度场有限元分析模型

图4为模型的几何尺寸。试验试件屋面系统由三块角驰 470 铝镁锰金属板组成, 单块屋面板尺寸为 470 mm×1200 mm, 屋面所用涂漆材料为氟碳, 屋面颜色为白色, 其构造包括金属屋面、支座、檩条。只考虑屋面温度分布情况, 所以在试验时将屋面与檩条之间保持一定距离, 并减少了屋面与檩条之间的保温材料。屋面构造如图5所示。

图6为对应 ANSYS 建模的有限元模型(网格划



图4 三跨直立锁缝屋面几何尺寸 mm

Fig. 4 Geometric dimensions of the three span vertical seam roof



(a) 背面



(b) 正面

图5 屋面构造

Fig. 5 Structure of front and back sides of the roof

分粗细对温度场计算结果有影响, 但影响较小, 在接受范围之内)。

采用 ANSYS APDL 语言, 针对试验选取的直立锁缝屋面系统, 有限元模型所采用的热分析单元以及材料的热物理性能见表1和表2。

檩条和檩条支座等杆件单元采用 Link 33 单元模拟杆系单元之间的传热, 采用 Link 34 单元模拟杆系单元与周围环境之间的对流换热。屋面板的热传导和热对流采用 Shell11 31 和 Surf 152 单元, 单元连接方式如图7所示。Link 33 单元为三维二节点

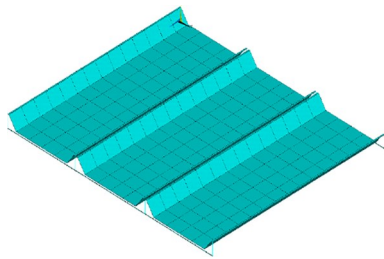


图6 三跨直立锁缝屋面温度场有限元模型
Fig. 6 Finite element model of temperature field of the three span vertical seam roof

表1 热分析单元

Table 1 The heat analysis units

传热方式	单元类型
热传导	Link 33、Shell 131
热对流	Link 34、Surf 152
太阳辐射	节点热流率
周围环境与空气辐射	在复合换热系数施加

表2 材料热物理性能

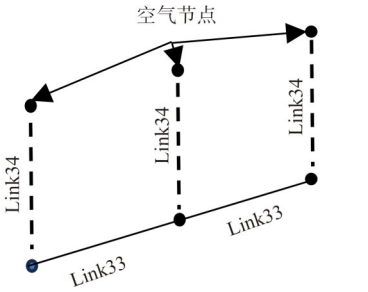
Table 2 Thermophysical properties of the materials

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热容/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	涂料 颜色	辐射吸 收系数
铝镁锰板	2700	899	229	白色	0.4
铝合金	2750	947	226	白色	0.5

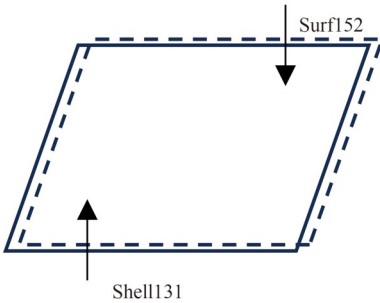
热传导单元,每个单元有2个节点,且节点只有1个温度自由度,单元实常数为传热面积,即为杆件截面面积。Link 34单元为杆系对流单元,同样每个节点只有1个温度自由度,Link 34单元的实常数为杆件表面积的1/2,建立有限元模型时,杆件单元用Link 33连接,在杆件两端分别建立1个Link 34单元,Link 34单元两节点重合,即零长度。针对面板结构,采用Shell 131单元模拟面板面内的热量传导, Surf 152单元模拟面板与周围环境的对流换热。

2.2 边界条件

- 1)太阳辐射作用(直接太阳辐射、散射太阳辐射、地面反射太阳辐射)。
- 2)空气对流换热作用。
- 3)环境长波辐射作用。
- 4)在晴朗无云天气时,屋面存在结构本身原因带来的阴影遮挡。直立锁缝屋面存在波峰与板肋,会由于屋面本身结构的影响,在一天太阳运动过程中屋面存在阴影的遮挡,但波峰、板肋的几何尺寸较小,所造成的阴影遮挡对屋面板温度场分布影响较小。故屋面系统95%以上面积都处于太阳的直接照射下无阴影遮挡。



(a) 杆系结构



(b) 面板单元

图7 热分析模拟单元示意

Fig. 7 Schematic diagram of the heat analysis simulating unit

2.3 温度场结果

取最不利工况,即最热月8月,查询历年气象资料,石家庄市地理坐标为114°E,35°03'N,全年月平均气温最低和最高月份分别为1月和7月,1月与7月温度变化趋势相同仅相差一个整体温差,故选取石家庄2023-08-30 T 8:00—18:00进行试验。

为了更好研究屋面板在一天中不同时段温度场,分别提取屋面试件热分析结果中9:00、13:30、16:00时刻的温度场云图,详见图8。可以清楚地看到面板表面温度随时间近似呈正弦曲线变化,同时屋面板的温度场趋于均匀。

3 试验部分

3.1 试验装置

为进一步验证仿真结果,对直立锁缝金属屋面系统进行试验。直立锁缝铝合金屋面系统是常用的屋面系统,主要由檩条、支座、屋面板和自攻螺钉组成。直立锁缝屋面可以描述为彼此相邻的金属板组合,并通过所谓的“接缝”沿其侧面连接。屋面板和支座顶部扣合连接,支座底部与檩条用自攻螺钉相连接。

本文制作了4个试件,研究温度场及其变化(图4)。选取角驰470型铝镁锰屋面板,4个试件长度为1200 mm,宽度为1430 mm。试件由屋面板、支座、檩条组成。2023年8月30日在石家庄对4个试

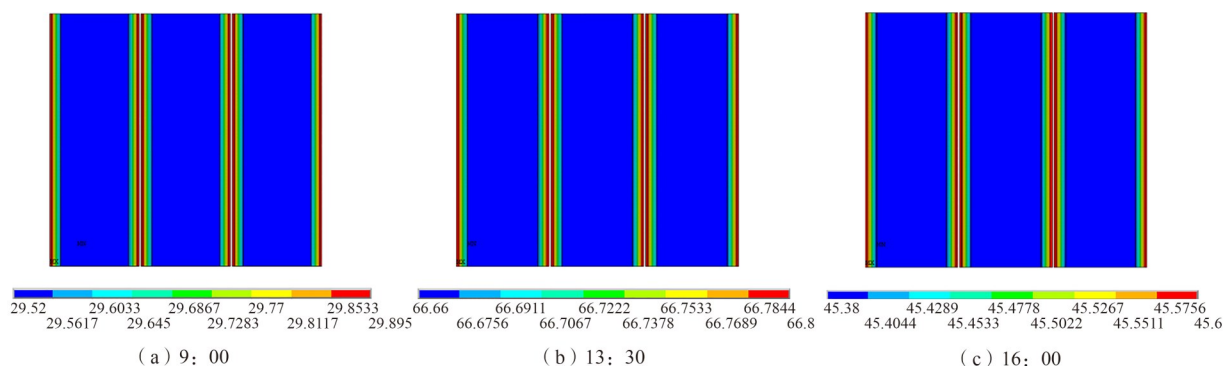
图8 屋面不同时刻温度 $^{\circ}\text{C}$

Fig. 8 Temperature distribution on the roof at different time points

件进行试验温度测量。

试验方案如表3所示。在4个试件中,研究了倾角和空间位置对屋面温度场分布的影响。参照GB/T 6891—2018《铝及铝合金压型板》,选取屋面板水平面的倾角分别为 0° 、 15° 和 45° 。空间朝向以东(EW)和南北(SN)垂直布局开展研究。

表3 试验试件工况
Table 3 Working conditions of the specimen

试件编号	倾角/ $^{\circ}$	朝向	宽度 $\times$ 长度/mm
1	0	SN	1430 $\times$ 1200
2	15	SN	1430 $\times$ 1200
3	45	SN	1430 $\times$ 1200
4	0	EW	1430 $\times$ 1200

3.2 测点布置

温度传感器测点布置如图9所示。

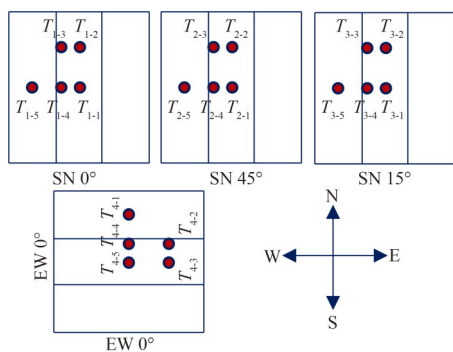


图9 温度测点布置

Fig. 9 Distribution of temperature monitoring points

4个试件共设置20个测点,其中,每个屋面5个测点,3个在屋面板1/2长度处,另外2个位于1/3长度处,5个测点中3个在板面上,2个在板肋上。屋面温度测点用 T_{x-y} 表示,其中, x 代表试件的编号, y 代表试件上的测点编号。

4个试件不同倾角摆放状态如图10所示。

3.3 数值分析与试验结果

考虑了不同倾角下直立锁缝屋面板顶板面和板肋的温度场,直立锁缝屋面板各测点的温度变化曲线如图11所示。可知:屋面板各测点温度大致相同,最高温度值出现在13:30左右。测点 T_{2-2} 的最高温度为 66.5°C ,与周围空气温度最大温差约为 33°C 。在倾角为 0° 时,空间位置对屋面板温度影响不大,不同位置面板表面和面板肋之间的差异不明显,进一步证明屋面板表面温度场是均匀的。对比试验和仿真结果可知,屋面最高温度分别为 66.93 、 66.45°C ,板肋表面温度高于屋面板,误差随温度的升高而减小,且有限元计算结果与试验结果的最大误差为 7.2% 。综上所述,数值模拟方法对于分析太阳辐射作用下直立锁缝屋面板的温度场是有效的。

由图11(b)、(c)可知:在SN 45° 和SN 15° 处,顶板的最高温度分别为 66.93 、 62.68°C 。且倾角越大,屋面板各个测点之间的温差越显著。进一步对比分析表明,直立锁缝屋面板的温度场在面板表面和面板肋处是均匀的。屋面板最高温度达到 66.93°C ,与环境空气温度最大温差 33.93°C ,出现在SN 45° 处。屋面板倾角越大,屋面板各测点的温度分布越不均匀,屋面板水平放置时,屋面板各测点温度更加均匀。

分析图11得知,板肋温度高于板面温度,且倾角越大温差越大。详细观察试验数据,在板肋处由于两个板面折叠,中间部分与空气接触少,内部板面散热缓慢,散热不及中间板面,导致板肋处的外板面高于屋面。根据太阳辐射计算理论,当屋面倾角增大时,板肋的辐射值一直大于板面,且随着倾角的增大差值也在增大。同时在试验中观察到,随着屋面倾角增大,板肋更容易完全处于太阳照射中,而当屋面倾角为 0° 时,会由于角度问题板肋有一侧或部分区域有淡色的阴影覆盖,这也印证了试验结果。

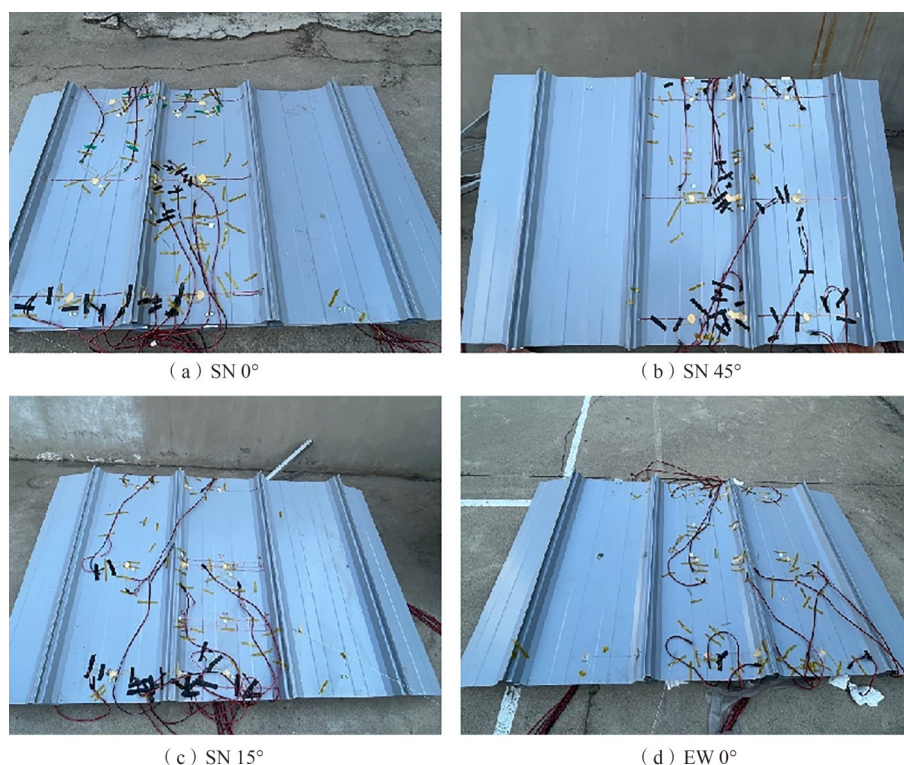


图 10 屋面试件不同摆放状态
Fig. 10 Differnt placing states of test specimen on the roof

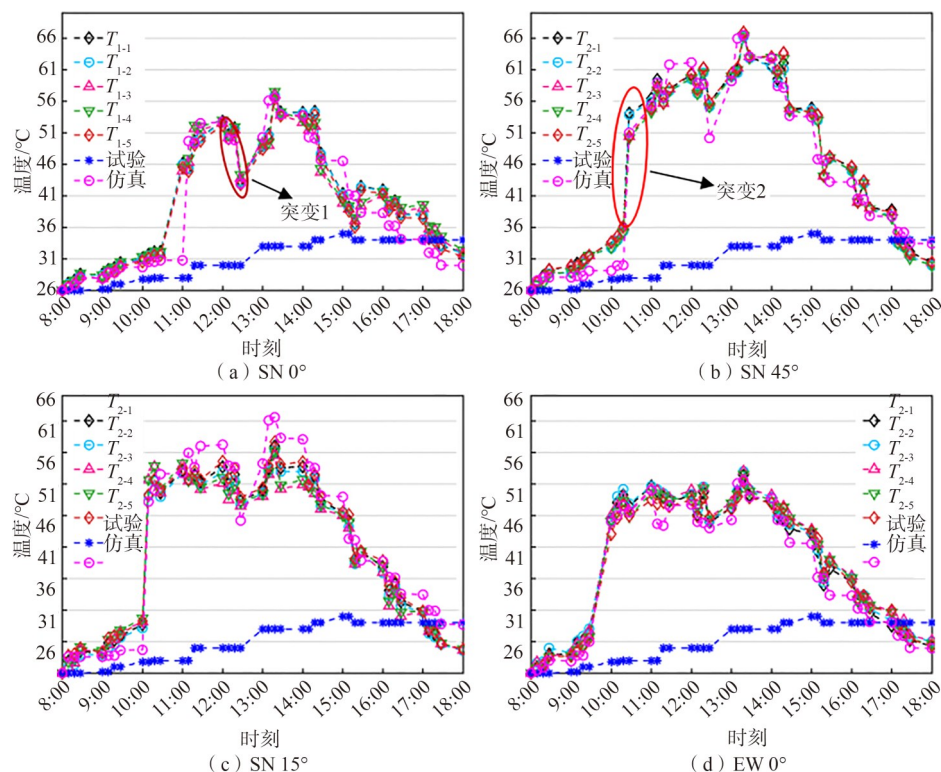


图 11 不同倾角屋面板各测点温度
Fig. 11 Temperature of each monitoring points on roof placed at different inclination angles

通过图 11 可知:在不同的倾斜角度,以及不同的空间位置,顶板面和顶板肋的仿真温度与实测温度

数据值并不一致,但二者变化趋势十分吻合,证明热分析理论模拟较为可靠。对于数值模拟与实测数据

的差异,在实际的自然环境中,热传导、热对流、热辐射三种换热方式是非常复杂的综合过程,数值仿真数据与实测温度数据只要保持一天中的温度数据变化趋势吻合,足以证明仿真所采用的热分析理论可基本满足工程需要。

对图 11(a)中突变 1 分析:由于 12:30 和 12:45 时刻的风速分别为 1.6, 3.3 m/s, 根据复合换热系数计算流程, 对流换热系数计算式为:

$$h_k = 2.6 \left(\sqrt[4]{T_v - T_a} + 1.54 V_w \right) \quad (5)$$

式中: V_w 为传感器测得的风速数据。代入风速数据和温度数据, 得到 12:30、12:45 时刻的对流换热系数分别为 14.446, 19.648 W/(m²·K⁴)。可见, 屋面板受风速影响较大, 风速越大, 屋面与周围环境对流越激烈,

屋面温度越低。

同时对图 11(b)中突变 2 温度出现激增情况进行分析, 提取热分析结果中屋面板 10:00、10:15 时刻温度云图结果, 如图 12 所示。结合图 10、12, 由于试验场地限制, 10:00 时附近高楼遮挡屋面, 屋面处于阴影状态, 只受到太阳散射、太阳反射, 到 10:15 时, 附近建筑物不再遮挡屋面, 屋面完全处于太阳直射中, 辐射值增加了太阳直接辐射。根据 1.1.2 节中式(2)~(4)计算, 屋面板在 10:00、10:15 时刻太阳辐射值分别为 162.46, 894.85 W/m², 其中, 屋面受到日照时太阳直接辐射占总太阳辐射的 81.58%。结合屋面试验温度数据结果可知: 铝合金屋面系统是“热敏系统”, 太阳辐射值与屋面板呈正相关, 即太阳辐射中太阳直接辐射是导致屋面系统温度急剧上升的主要影响因素。

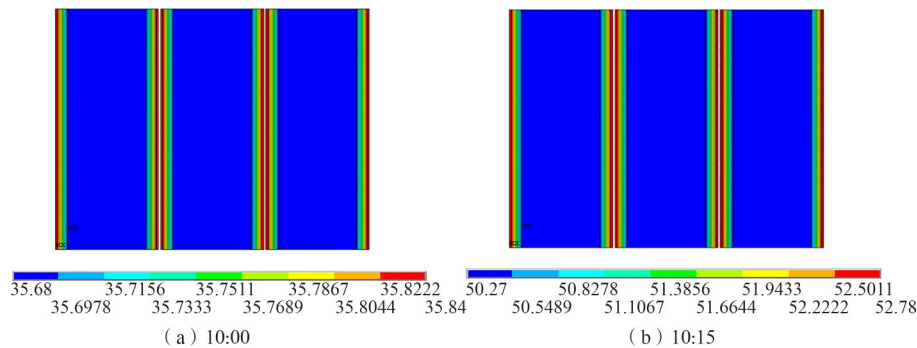


图 12 突变 2 温度 °C

Fig. 12 Temperature distribution at temperature burst 2

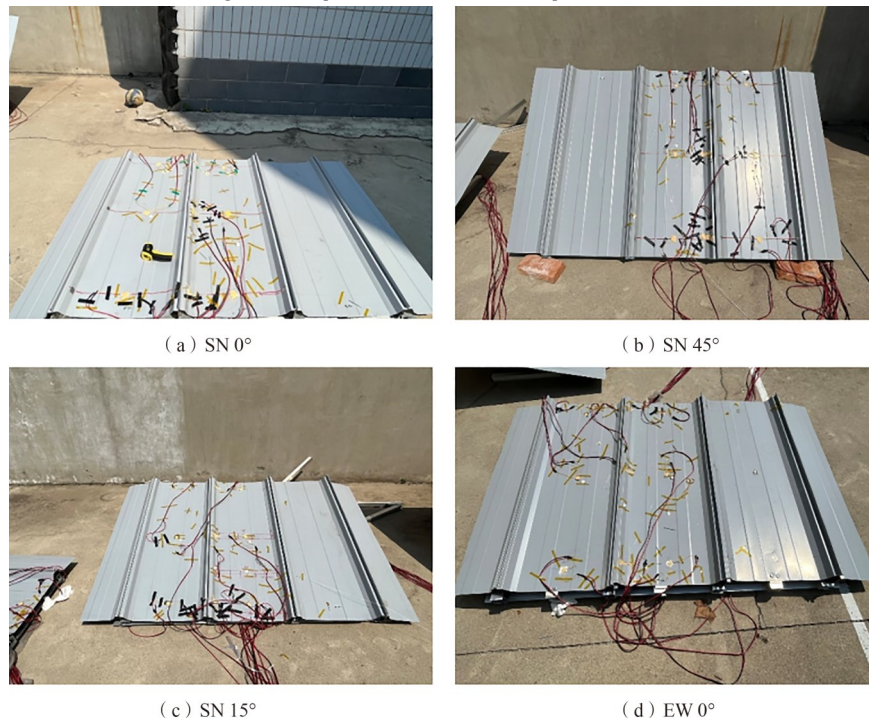


图 13 屋面试件完全处于太阳照射状态

Fig. 13 Roof specimen thoroughly under solar radiation

4 结 论

本文对直立锁缝屋面板在太阳辐射下的温度场及其变化进行了试验研究,并依据热分析理论与太阳晴空模型进行屋面系统的数值仿真热分析,试验验证了该模型的有效性。

1)提出的屋面板温度场的数值模拟方法是有效的。将数值仿真得到的屋面板温度数据与光纤传感器采集的温度数据进行对比分析验证,证明了试验及仿真结果的正确性和吻合性。

2)直立锁缝屋面的温度明显高于环境空气温度,最大温差可达 33.93℃。屋面板的倾角越大,屋面板的板肋与板面温差越显著,同时实测与数值仿真温差差异也愈发显著,板面与板肋最大温差约为 3℃。数值仿真与实测数据最大温差约为 5℃。

3)屋面板温度受太阳辐射强度和风速的影响较大,太阳辐射强度越大,屋面温度越高,同时风速越大,屋面与周围环境的对流换热越激烈,屋面温度越低。屋面板温度与太阳辐射强度呈正相关,与风速负相关。在不同参数下,屋面板温度场趋于均匀分布。

参 考 文 献

- [1] 王乐. 复杂空间金属屋面复合系统应用技术[J]. 门窗, 2017(1):225.
- [2] LEE J H, KALKAN I. Analysis of thermal environmental effects on precast, prestressed concrete bridge girders: temperature differentials and thermal deformations [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2012, 15(3):447-459.
- [3] KIM S H, CHO K I, WON J H, et al. A study on thermal behaviour of curved steel box girder bridges considering solar radiation [J]. *Archives of Civil & Mechanical Engineering*, 2009, 9(3):59-76.
- [4] ABID S R, TAYI N, ZAKA M. Experimental analysis of temperature gradients in concrete box-girders [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 106:523-532.
- [5] NOORZAEI J, BAYAGOOB K H, THANOON W A, et al. Thermal and stress analysis of Kinta RCC dam [J]. *Engineering Structures*, 2006, 28(13):1795-1802.
- [6] GENG L, TAN C, YAN Y, et al. Correction of the temperature effect in calibration of a solar radio telescope [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2021, 21(6):221-230.
- [7] GREVE A, MANGUM J G. Mechanical measurements of the ALMA prototype antennas [J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2008, 50(2):66-80.
- [8] YANG G T, BRADFORD M A, et al. Thermal-induced upheaval buckling of concrete pavements incorporating the effects of temperature gradient [J]. *Engineering Structures*, 2018, 164:316-324.
- [9] EASLEY J J T. Buckling formulas for corrugated metal shear diaphragms [J]. *Journal of the Structural Division*, 1975, 101(7): 1403-1417.
- [10] 宋爱国,王福然. 北京地区晴天太阳辐射模型初探[J]. *太阳能学报*, 1993(3):251-255.
- [11] 陈志华,刘红波,闫翔宇,等. 在平体育馆弦支穹顶叠合拱结构的温度场研究[J]. *空间结构*, 2010, 16(1):76-81.
- [12] 盛一安,王柏生. 钢结构构件日照温度场和温度作用取值研究 [J]. *低温建筑技术*, 2021, 43(6):52-57.
- [13] 金晓飞,范峰,李景芳. 山西三馆日照非均匀温度作用分析[J]. *空间结构*, 2012, 18(3):80-85.
- [14] 刘树堂,龙期亮. 基于ASHRAE晴空模型的日照作用下钢构件的温度场分析[J]. *建筑钢结构进展*, 2012(5):35-43.
- [15] 刘红波,陈志华,周婷. 太阳辐射作用下钢管温度场分析[J]. *空间结构*, 2011, 17(2):65-71.
- [16] 王明明,辛志勇,区彤,等. 直立锁边铝合金屋面系统温度效应试验研究[J]. *工业建筑*, 2021, 51(8): 126-136.
- [17] 王彦峰,吴小蕙,范绍有,等. 有无抗风夹直立锁边屋面系统温度效应试验研究[J]. *建筑科学*, 2022, 38(9): 122-128.
- [18] 任建,苗吉军,李健,等. 连续焊接不锈钢金属屋面系统温度循环作用下工作性能试验研究与理论分析[J]. *建筑结构*, 2021, 51(18): 62-68.
- [19] 仇子文,刘才玮,胡靖,等. 环境温度作用下连续焊接不锈钢屋面系统静动力性能分析[J]. *工业建筑*, 2025, 55(11):36-44.
- [20] SINGH M, GULATI R, SRINIVASAN R S, et al. Three-dimensional heat transfer analysis of metal fasteners in roofing assemblies [J]. *Buildings*, 2016, 6(4):49.
- [21] WANG D, XIN Z, WANG M, et al. Analysis of temperature field and effect of cold-formed stainless steel roof panels [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2022, 198:107575.