

7075 铝合金板自然环境太阳辐射热效应 及影响因素分析

雷凯, 任战鹏, 李玄, 马建军, 吴竞

(中国飞机强度研究所, 西安 710065)

摘要: **目的** 研究典型金属材料在自然太阳辐射环境下的热效应, 并分析试验件属性及环境参数等不同因素对材料热效应的影响规律。**方法** 通过设计自然环境下太阳辐射热效应试验方案, 分析涂层颜色、粗糙度等对 7075 铝合金材料太阳辐射热效应的影响, 建立一种太阳辐射环境下稳态温度的计算算法。**结果** 获取了在 9 月前后 20 d 内的外场辐照度及 10 组试验件的温度测量数据, 得到了涂层颜色、粗糙度等对材料热效应的影响规律。此外, 建立的简化算法和试验数据误差在 5% 以内, 具有精度高、形式简单等优势, 可以应用于给定辐照强度下典型材料热效应的预测。**结论** 针对特定试验件, 辐照度和风速是影响其热效应的主要因素。当辐照强度在较高的范围内变化时, 试验件温升基本和辐照度成正比。随着自然环境风速的增加, 试验件温度的下降幅度减小。

关键词: 太阳辐射; 热效应; 工程算法; 涂层颜色; 粗糙度; 辐照度; 风速

中图分类号: TJ8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2023)06-0155-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.06.020

Thermal Effect and Influencing Factors Analysis of 7075 Aluminum Alloy Plates in Natural Solar Radiation

LEI Kai, REN Zhan-peng, LI Xuan, MA Jian-jun, WU Jing

(Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: The work aims to study the thermal effect of typical metal materials in the natural solar radiation environment and analyze the influence rules of different factors such as the properties of test pieces and environmental parameters. The influence of coating color, roughness, etc. on solar radiation thermal effect of 7075 aluminum alloy materials was analyzed by designing the test plan of solar radiation heat effect in natural environment, a steady temperature calculation algorithm under solar radiation environment was established. The field irradiance and temperature measurement data of 10 groups of test pieces within 20 days before and after September were obtained. Based on the data, the influence rules of coating color, roughness, etc. on thermal effect of materials were revealed. In addition, the error of the simplified algorithm and test data established in this paper was less than 5%, which had the advantages of high accuracy and simple form, could be used to predict the thermal effect of typical materials under a given irradiation intensity. For a specific test piece, irradiance and wind speed are the main factors af-

收稿日期: 2022-10-13; 修订日期: 2022-11-07

Received: 2022-10-13; Revised: 2022-11-07

作者简介: 雷凯 (1993—), 男, 硕士。

Biography: LEI Kai (1982-), Male, Master.

引文格式: 雷凯, 任战鹏, 李玄, 等. 7075 铝合金板自然环境太阳辐射热效应及影响因素分析[J]. 装备环境工程, 2023, 20(6): 155-161.

LEI kai, REN Zhan-peng, LI Xuan, et al. Thermal Effect and Influencing Factors Analysis of 7075 Aluminum Alloy Plates in Natural Solar Radiation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(6): 155-161.

fecting its thermal effect. When the radiation intensity changes in a high range, the temperature rise of the test piece is basically proportional to the irradiance. With the increase of wind speed in the natural environment, the temperature drop of the test piece decreases.

KEY WORDS: solar radiation; thermal effect; engineering algorithms; coating colors; roughness; irradiance; wind speed

太阳辐射试验是验证工业产品环境适应性的一项典型试验,用于确定太阳辐射对产品产生的热效应和光化学效应^[1-3]。对于军用装备,太阳辐射试验是其研制过程中的必要试验,一般在自然环境和人工模拟的实验室环境中开展^[4]。由于实验室试验具有条件可控、周期短、可复现性等一系列优点,是我国装备太阳辐射环境适应性验证的主要手段。针对太阳辐射试验热效应分析,GJB 150.7A—2009《军用装备实验室环境试验方法 第七部分:太阳辐射试验》^[5]给出了具体的试验程序。该程序以1 h为间隔,要求了每个时间点的环境温度以及辐照度。为了防止“过试验”和“欠试验”,该标准指出应对模拟光源的辐照度进行调整,以得到相同的热效应,保证实验室环境和自然环境具有等效性。因此,在开展某试验件实验室太阳辐射试验前,首先应分析其典型组成材料在外场太阳辐射环境下的温度响应,作为实验室环境等效性分析的基础^[6]。

针对太阳辐射试验方法,国内外学者主要从试验和仿真 2 方面对太阳辐射环境热效应分析开展了相关研究。在试验方面,Abu Talib 等^[7]设计了4种颜色(红、黑、白、灰)的圆筒结构试验件,研究了自然太阳辐射环境对发动机短舱结构的热效应。陈志华等^[8]采用分光光度计测定了钢结构常用涂料的太阳辐射吸收系数,基于实测数据得到了面漆颜色对结构温度场和温度效应具有较大影响等结论。董海荣等^[9]通过开展涂料外饰面材料自然环境太阳辐射试验,分析了不同颜色和粗糙度对其温度的影响。羊军等^[10]设计了实验室全光谱太阳辐射试验温度测量方案,获取了线缆设备的温度分布。万章博等^[11]分析了混凝土结构组成的无砟轨道道床板在冬季太阳辐射下的表面温度分布。孙永康等^[12]分析了不同铺装材料在太阳辐射下的热效应。陈可等^[13]通过对钢管混凝土拱肋截面日照温度场进行现场测试,得出了钢管混凝土拱肋截面沿直径方向出现最大温差时的温差分布曲线。在仿真方面,潘丞雄等^[14]通过数值仿真研究了直升机机身表面的温度场,分析了太阳辐射对结构的温升效应。王连江等^[15]通过 CFD 软件建立了考虑太阳辐射的飞机座舱温度场仿真模型。庞丽萍等^[16]通过实测并结合仿真分析开展了民机客舱中太阳辐射对热舒适性的影响研究。姚英姿等^[17]建立了户外电子设备热仿真模型,研究了不同防护方式对热效应的影响。李丽芬^[18]通过试验方法对海南湿热气候条件下汽车的热环境参数进行了实测,并基于 ICEM CFD 软件,建立了整

车热负荷数值计算模型,研究表明,太阳辐射下汽车零部件的热负荷十分严酷。乔木等^[19]利用 FLUENT 中太阳加载模型,并开发 UDF 程序,建立了飞艇传热模型,通过数值模拟热传导过程获得了飞艇温度分布情况。包胜等^[20]采用仿真与试验相结合的方法,对小型高轨星载天线进行了热分析,研究了全轨道工况下不同太阳辐射角 β 和不同天线材料表面吸收率和发射率的比值 a/ε 对天线温度的影响。针对混凝土、路面、桥梁、大坝等,文献[21-25]基于传热理论开展了数值仿真研究。目前,大多文献都集中在土木建筑领域,对武器装备的太阳辐射热效应研究较为有限,相关数据难以获取,不利于装备太阳辐射试验设计。

本文以典型铝合金金属板为研究对象,设计了自然环境下太阳辐射热效应分析试验方案,分析不同涂层颜色对其热效应的影响,相关试验数据可为实验室太阳辐射试验设计提供参考。此外,本文建立了一种太阳辐射环境下稳态温度分析简化算法,分析了辐照度、风速等因素对金属板温度响应的影响。

1 太阳辐射试验方案设计

针对武器装备结构中常用的 7075 铝合金,本文设计了自然环境太阳辐射试验方案,分析了涂层颜色和表面粗糙度对其温升的影响。其中,试验件由 10 件 300 mm×300 mm×2 mm 的金属板组成,2 个为裸材铝板,表面未涂漆,其余分别在上下表面涂黑漆、白漆、灰漆、红漆、蓝漆、黄漆、绿漆、紫漆。1 个表面未涂漆的试验件表面粗糙度为 25 μm ,其余 9 个试验件均为 6.3 μm 。将 10 块金属板从 1—10 对其进行编号,颜色分别为黄、黑、无色(粗糙度 25)、紫、白、红、绿、灰、无色(粗糙度 6.3)、蓝,布置方式如图 1 所示。

本次试验地点位于西安阎良区,试验时间为 2021 年 8 月 21 日—9 月 10 日。试验整体方案如图 2 所示,

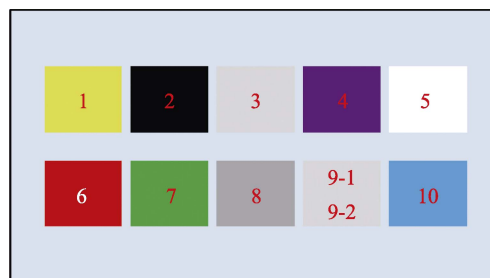


图 1 试验件布置方式
Fig.1 Layout of test pieces

通过支撑台架放置在空旷的户外环境, 四周无遮挡。其中, 试验支持台架放置于地面上, 在台架表面放置橡塑海绵, 减少地面反射太阳光对试验件温度的影响。此外, 橡塑海绵表面粘贴有铝箔, 起反射太阳光和防护等作用, 避免温度过高对试样温度的测量带来误差。将标准试样放置在橡塑海绵上, 四周通过金属胶带固定。在下表面中心处粘贴热电偶, 其编号和试验件编号一致。为了研究金属板上下表面的温度差异, 在 9 号板上表面中心处布置一个热电偶 (对应图 1 中序号 9-2)。在周边放置辐照计, 测量环境辐照度以及环境温度。通过采集装置每 30 s 测量一次数据, 通过计算机终端实时显示自然环境下的辐照度和环境温度, 以及试样温度。试验现场照片如图 3 所示。

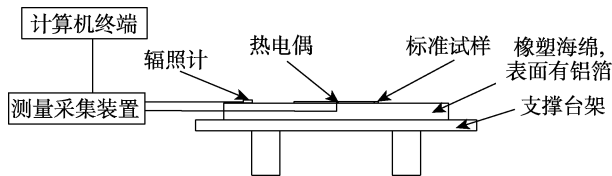


图 2 金属板自然环境太阳辐射试验方案

Fig.2 Test scheme for thermal effect of metal plates in natural solar radiation condition

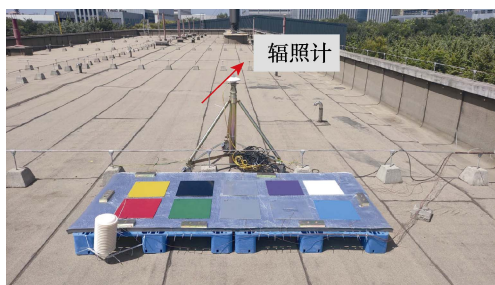


图 3 试验现场照片

Fig.3 Photo of test field

2 结果及分析

2.1 辐照度测量结果

本次试验周期内, 测得每天的最大辐照度如图 4 所示。其中, 辐照度较低的几天为阴天或雨天。5 组晴天 06:00—19:00 时间段内的辐照度分布规律如图 5 所示。试验周期内, 大部分时间辐照度受到云层的影响, 出现剧烈波动。8 月 27 日—9 月 7 日的天气情况较为理想, 测得的最大辐照度出现在 12 点 30 分附近, 基本沿该时刻两侧对称分布。

2.2 金属板温度分布测量结果

以 8 月 27 日测得的数据进行分析, 得到 10 个试验件的温度分布, 如图 6 所示。各试验件在 12:00—13:00 时间段内的平均温度见表 1。由此可得, 涂层

颜色对试验件热效应的影响由高到低为: 黑、紫、灰、绿、蓝、红、黄、无色、白色。此外, 试验件上表面温度略高于下表面温度, 较粗糙的表面会引起试验件表面温度上升。分析 9 月 7 日试验数据可得相似的结果。

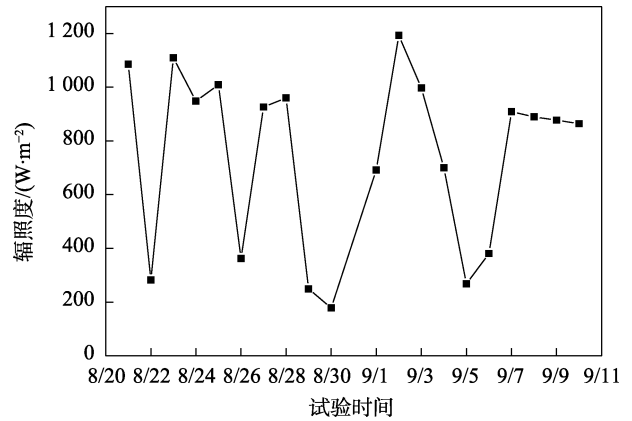


图 4 试验周期内每天的最大辐照度

Fig.4 Maximum irradiance per day during the test cycle

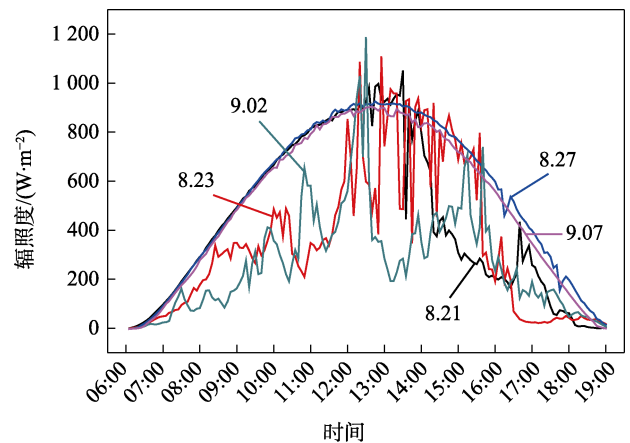


图 5 06:00~19:00 时间段内 5 组晴天的辐照度分布情况

Fig.5 Irradiance distribution from 06:00 to 19:00 in 5 sunny days

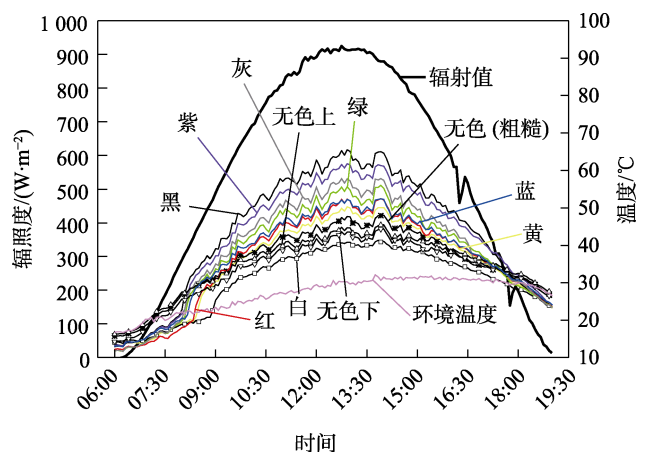


图 6 8 月 27 日试验数据中试验件温度分布情况

Fig.6 Temperature distribution of test pieces in experimental data on Aug.27

表1 试验件 12:00—13:00 时间段内温度分布
Tab.1 Temperature distribution of test pieces from 12:00 to 13:00

试验件类型	试验件平均温度/°C
黄	48.21
黑	62.99
无色 (粗糙度 25)	45.79
紫	59.63
白	39.77
红	50.18
绿	53.34
灰	55.71
无色 (粗糙度 6.3)	下表面: 42.11 上表面: 43.28
蓝	50.59

3 稳态温度计算简化算法及影响因素分析

3.1 热传递理论分析

太阳辐射作用下,金属板热传递主要包括热对流和热辐射,其中热对流的主要形式为试验件表面与大气对流换热,其热流密度 q_c 的表达式见式(1),对流换热系数经验公式见式(2)。

$$q_c = h(T_e - T_s) \quad (1)$$

$$h = 2.6(\sqrt[4]{T_e - T_s} + 1.54v) \quad (2)$$

式中: T_e 表示环境温度, K; T_s 表示试验件表面温度, K; h 表示对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; v 为风速, m/s。

热辐射的主要形式为太阳辐射产生的热流密度 q_s 和辐射换热产生的热流密度 q_r , q_r 包括试验件与天空之间的辐射换热和试验件和地面间的辐射换热。 q_s 的计算公式为:

$$q_s = aG \quad (3)$$

$$q_r = \sigma \varepsilon [F_{gs}(T_g^4 - T_s^4) + F_{as}(T_a^4 - T_s^4)] \quad (4)$$

式中: a 表示试验件太阳辐射吸收率; G 表示太阳辐射强度, W/m^2 ; σ 表示斯蒂芬波尔兹曼常数, 其值为 $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$; ε 为试验件发射率; T_g 为地面温度, K; T_a 为天空有效温度, K, 一般认为比空气温度低 $6 K^{[26]}$; F_{gs} 为接受太阳辐射作用的表面与地面之间的角系数; F_{as} 为接受太阳辐射作用的表面与天空之间的角系数。

太阳辐射作用下金属板换热边界条件为式(5)。

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial \eta_r} = q_s + q_c + q_r \quad (5)$$

在达到热平衡状态时,式(5)的值为0。由式(1)、(3)和(4)可得太阳辐射作用下金属板稳态热平衡方程为:

$$h(T_s - T_e) + aG + \sigma \varepsilon [F_{gs}(T_g^4 - T_s^4) + F_{as}(T_a^4 - T_s^4)] = 0 \quad (6)$$

由于地面反射的太阳光被橡塑海绵吸收,因此分析中忽略了试验件和地面间的辐射换热。同时本试验在空旷的房顶进行,可认为 F_{as} 值为1。式(6)可进一步简化为式(7)。

$$h(T_s - T_e) + aG + \sigma \varepsilon [(T_e - 6)^4 - T_s^4] = 0 \quad (7)$$

该方程是四次非线性方程,求解较为困难。因此,本研究对四次项部分进行简化。

3.2 稳态温度分析简化算法

以8月27日测得的试验数据为例,对简化算法进行介绍。在12:00—13:00时间段内,环境平均温度为29.64。针对函数式(8),当 $T_e = 302.79 K$ 时, y 的值和 T_s 的关系如图7所示。

$$y = \sigma [(T_e - 6)^4 - T_s^4] / (T_e - T_s) \quad (8)$$

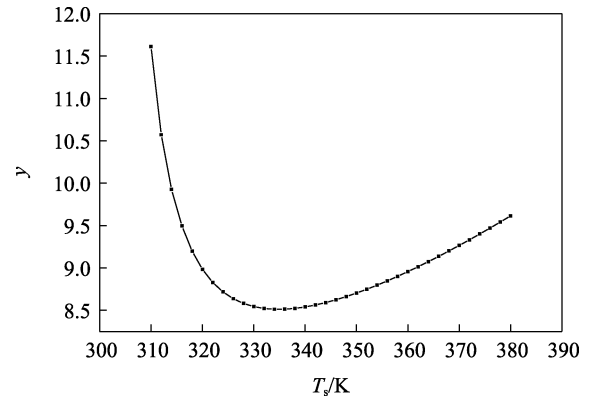


图7 函数式 y 值和 T_s 关系

Fig.7 Relationship between value y of function and T_s

一般情况下,试验件稳定温度 T_s 大于环境温度 T_e 的值在 $10 \sim 60 K$, 函数式 y 值为 $10.57 \sim 9.01$ 。分析中可以选取为某常数,通过该方法可将四次项部分近似表达为一次项。由图7可以看出,当试验件热效应较低时, y 值的变化幅度相对较大。因此,针对该情况,常数值设置采用见式(9)。

$$\sigma [(T_e - 6)^4 - T_s^4] = (T_e - T_s) \cdot P \begin{cases} P = 9.50 (\text{热效应较低}) \\ P = 8.67 (\text{其他}) \end{cases} \quad (9)$$

其中,当试验件(白色金属板等)热效应较低时, P 的值为函数式(8)中 y 在 $10 \leq T_s - T_e \leq 20$ 时的平均值 9.50; 其他情况下, P 的值为函数式(8)中 y 在 $20 < T_s - T_e \leq 60$ 时的平均值 8.57。因此,金属板稳态温度值可通过式(10)进行计算。

$$T_s = \frac{aG}{h + \varepsilon P} + T_e \quad (10)$$

对黑色金属板稳态温度进行分析,其中 $a = \varepsilon = 0.97$, G 取 12:00—13:00 时间段内的平均值 $911.69 W/m^2$, P 取 8.67。由经验公式(2)可知, h 值主要影响因素为风速 v , $\sqrt[4]{T_e - T_s}$ 的值可近似用常

数处理,选取为 $10 \leq T_s - T_e \leq 60$ 时该表达式的平均值 2.38, 通过风速仪测得该时间段的平均风速为 3 m/s, h 为 $18.20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。由式(10)可得, T_s 为 336.02 K, 高于环境温度 $33.23 \text{ }^\circ\text{C}$ 。按照相同方法对白色金属板进行分析, 其中 $a=0.3$, $\varepsilon=0.96$, P 取 9.50。在相同环境下, 计算得到 T_s 值为 312.80 K, 高于环境温度 $10.01 \text{ }^\circ\text{C}$, 与试验结果对比情况见表 2。可以看出, 该简化算法具有较高的准确度。

表 2 试验件温度理论分析结果和试验结果对比
Tab.2 Comparison between theoretical analysis results and test results of test piece temperature

试验件类型	理论值/ $^\circ\text{C}$	试验值/ $^\circ\text{C}$	误差/%
黑	62.87	62.99	-1.91
白	39.65	39.77	-3.02

3.3 影响因素分析

由式(10)可得, 试验件在自然环境太阳辐射条件下处于稳态时, 相对环境温度的温升取决于 $aG/h + \varepsilon P$ 的值。其中, a 和 ε 为材料固有属性, 因此主要影响因素为辐照度和风速。

表 3 各时间段辐照度和试验件温升对比

Tab.3 Comparison between irradiance and temperature rise of test pieces in different periods

时间段	辐照度/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	辐照度变化倍数	黑板温升/ $^\circ\text{C}$	黑板温升变化倍数	灰板温升/ $^\circ\text{C}$	灰板温升变化倍数
10:00—11:00	750.77	1	27.01	1	20.90	1
11:00—12:00	860.29	1.146	30.54	1.131	23.76	1.137
12:00—13:00	911.69	1.214	33.35	1.23	26.07	1.247
13:00—14:00	902.48	1.202	32.53	1.204	26.07	1.247
14:00—15:00	826.80	1.101	27.94	1.034	25.04	1.198

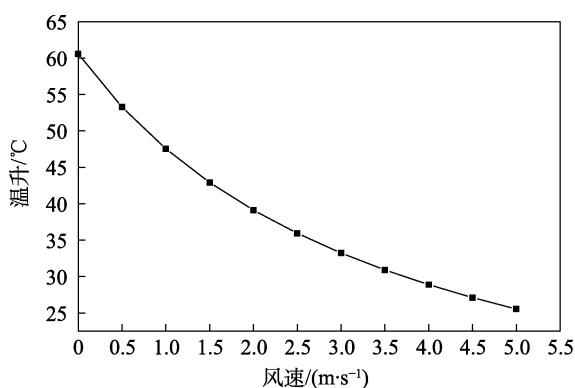


图 8 风速和试验件温升的关系

Fig.8 Relationship between wind speed and temperature rise of test pieces

4 结论

本文以不同形式的 7075 铝合金金属板为试验对象, 设计了自然环境太阳辐射热效应分析试验方案, 获取了不同辐照度下各试验件的温度, 分析了涂层颜

3.3.1 辐照强度分析

当辐照强度在较高的范围内变化时, 环境温度 T_e 的变化幅度不高, 由式(8)和式(9)可得, P 值的变化程度较小。此外, 由图 7 可知, 针对热效应较高的试验件, P 值的变化程度较小。因此, 试验件温升基本和辐照度成正比。黑色和灰色金属板 8 月 27 日的试验数据中, 各时间段内的平均辐照度和试验件温升对比情况见表 3。可以看出, 辐照度的变化幅度基本和温升变化幅度相同, 产生差异的部分原因为各阶段的风速不一致。因此, 当自然环境下太阳辐射强度从 $911.69 \text{ W}/\text{m}^2$ 增加到 GJB 150.7A—2009 中的最大值 $1120 \text{ W}/\text{m}^2$ 时, 可以预测此时的黑色金属板的温升将达到 $40.97 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3.3.2 风速分析

以 8 月 27 日测得黑色金属板的试验数据进行分析, 当其他条件不变, 风速从 0 m/s 按照 0.5 m/s 的幅度增加至 5 m/s 时, h 值从 $6.19 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 变化到 $26.21 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。可得 $911.69 \text{ W}/\text{m}^2$ 辐照度下试验件温升随风速的变化, 如图 8 所示。可以看出, 随着风速的增加, 试验件温度的下降幅度在减小。

色、表面粗糙度等因素对试验件温度的影响。此外, 本文建立了一种太阳辐射环境下稳态温度分析简化算法, 分析了辐照度、风速等因素对金属板温度响应的影响。得到以下主要结论:

1) 通过本次试验, 得到涂层颜色对试验件热效应的影响由高到低为黑、紫、灰、绿、蓝、红、黄、无色、白色。此外, 试验件上表面温度略高于下表面温度, 较糙度的表面会引起试验件表面温度上升。

2) 本文建立的简化算法和试验数据误差在 5% 以内, 具有精度高、形式简单等优势, 可以满足工程计算需要。

3) 针对特定试验件, 辐照度和风速是影响其热效应的主要因素。其中, 当辐照强度在较高的范围内变化时, 试验件温升基本和辐照度成正比, 随着自然环境风速的增加, 试验件温度的下降幅度在减小。

参考文献:

[1] 陈颖. 车载装备高温环境论证问题及对策探讨[J]. 环

- 境技术, 2022, 40(3): 182-186.
CHEN Ying. Discussion on Demonstration Problems and Countermeasures of High Temperature Environmental Conditions of Vehicle Mounted Equipment[J]. Environmental Technology, 2022, 40(3): 182-186.
- [2] 秦剑. 电子设备太阳辐射试验方法分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2016, 34(2): 15-21.
QIN Jian. Analysis of Solar Radiation Test Method for Electronic Equipment[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2016, 34(2): 15-21.
- [3] 吴为, 蒙伟. 地空导弹防太阳辐射的论证、设计与试验[J]. 上海航天, 2000, 17(6): 9-15.
WU Wei, MENG Wei. Demonstration, design and Test of Solar Radiation Protection of Ground to Air Missile[J]. Aerospace Shanghai, 2000, 17(6): 9-15.
- [4] 夏越美. 太阳辐射试验及其标准分析[J]. 航空标准化与质量, 2001(5): 33-38.
XIA Yue-mei. Solar Radiation Test and Its Standard Analysis[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2001(5): 33-38.
- [5] GJB 150.7A, 军用装备实验室环境试验方法 第七部分: 太阳辐射试验[S].
GJB 150.7A, Laboratory Environment Test Methods for Military Material—Part 7: Solar Radiation Test[S].
- [6] 刘海龙, 马英, 魏媛. GJB 150.7A-2009 太阳辐射试验方法分析与实践[J]. 环境技术, 2019, 37(2): 130-136.
LIU Hai-long, MA Ying, WEI Yuan. Solar Radiation Test Method and Practice of GJB 150.7A-2009 Standard[J]. Environmental Technology, 2019, 37(2): 130-136.
- [7] ABU TALIB A R, JAAFAR A A, MOKHTAR A S, et al. Significance of Solar Radiation on Aircraft Engine under Cowl Temperature[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea, and Air, Montreal, Canada. 2009: 195-202.
- [8] 陈志华, 陈滨滨, 刘红波. 钢结构常用涂料太阳辐射吸收系数试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(5): 81-87.
CHEN Zhi-hua, CHEN Bin-bin, LIU Hong-bo. Experimental Research on Solar Radiation Absorptance of Commonly Used Coatings for Steel Structures[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(5): 81-87.
- [9] 董海荣, 祁少明, 麻建锁, 等. 涂料外饰面的太阳辐射性能及对建筑节能影响的试验研究[J]. 建筑技术, 2011, 42(1): 71-73.
DONG Hai-rong, QI Shao-ming, MA Jian-suo, et al. Experimental Study on Solar Radiation of Coatings and Influencing on energy-Saving of Buildings[J]. Architecture Technology, 2011, 42(1): 71-73.
- [10] 羊军, 赵书平, 李金国. 实验室太阳辐射试验中温度测量的分析[J]. 环境技术, 2014, 32(4): 10-12.
YANG Jun, ZHAO Shu-ping, LI Jin-guo. Analysis of Temperature Measurement in Laboratory Solar Radiation Test[J]. Environmental Technology, 2014, 32(4): 10-12.
- [11] 万章博, 杨荣山, 任勃, 等. 太阳辐射对 CRTS I 型双块式无砟轨道道床板表面温度影响的试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(1): 1-6.
WAN Zhang-bo, YANG Rong-shan, REN Bo, et al. Experimental Study on the Impact of Solar Radiation Intensity on the Surface Temperature of Deck Slab for CRTS I Twin-Block Ballastless Track[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(1): 1-6.
- [12] 孙永康, 刘寒晓, 张艳, 等. 不同铺装材料地面停车场的热效应[J]. 水土保持通报, 2014, 34(1): 144-148.
SUN Yong-kang, LIU Han-xiao, ZHANG Yan, et al. Thermal Effects of Ground Parking Lot Covered with Different Surface Materials[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(1): 144-148.
- [13] 陈可, 李亚东. 钢管混凝土拱肋截面日照温度场实测及有限元计算[J]. 公路交通科技, 2012, 29(9): 77-84.
CHEN Ke, LI Ya-dong. Test and Finite Element Calculation of Solar Temperature Field of Section of CFST Arch Rib[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(9): 77-84.
- [14] 潘丞雄, 张靖周, 单勇. 直升机机身表面温度场建模与数值分析[J]. 航空学报, 2011, 32(2): 249-256.
PAN Cheng-xiong, ZHANG Jing-zhou, SHAN Yong. Modeling and Analysis of Helicopter Skin Temperature Distribution[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(2): 249-256.
- [15] 王连江, 赵竞全. 飞机座舱温度场数值仿真研究[J]. 计算机仿真, 2008, 25(5): 44-46.
WANG Lian-jiang, ZHAO Jing-quan. Numerical Simulation of Heat Transfer in Aircraft Cabins[J]. Computer Simulation, 2008, 25(5): 44-46.
- [16] 庞丽萍, 李恒, 王天博, 等. 民机客舱中太阳辐射对热舒适性的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(10): 1924-1930.
PANG Li-ping, LI Heng, WANG Tian-bo, et al. Effect of Solar Radiation on Thermal Comfort in Civil Aircraft Cabin[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(10): 1924-1930.
- [17] 姚英姿, 胡良果. 基于 Flotherm 的太阳辐射对户外电子设备温度影响[J]. 现代机械, 2017(4): 60-63.
YAO Ying-zi, HU Liang-guo. Influence of Solar Radiation on the Temperature of Outdoor Electric Product Based on Flotherm[J]. Modern Machinery, 2017(4): 60-63.
- [18] 李丽芬. 自然暴露下汽车乘员舱及内外部件热负荷规律仿真与试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
LI Li-fen. Simulation and Experimental of Vehicle Cabin and Components Thermal Load under Natural Exposure[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [19] 乔木, 王逸冉, 唐浩, 等. 低层近空间飞艇热环境数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2014, 33(4): 516-520.
QIAO Mu, WANG Yi-ran, TANG Hao, et al. Numerical Simulation of Thermal Environment of Airship in Low Layer near Space[J]. Journal of Liaoning Technical Uni-

- versity (Natural Science), 2014, 33(4): 516-520.
- [20] 包胜, 王超. 高轨星载天线热分析研究[J]. 电子机械工程, 2017, 33(4): 35-37.
BAO Sheng, WANG Chao. Thermal Analysis of High-Orbit Space-Borne Antenna[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2017, 33(4): 35-37.
- [21] 顾颖, 李亚东, 姚昌荣. 太阳辐射下混凝土箱梁温度场研究[J]. 公路交通科技, 2016, 33(2): 46-53.
GU Ying, LI Ya-dong, YAO Chang-rong. Research of Temperature Field of Concrete Box Girder under Solar Radiation[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(2): 46-53.
- [22] 郭风俊. 基于 ANSYS 的不平衡日照混凝土箱梁温度场分布研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(2): 207-212.
GUO Feng-jun. Research on Temperature Field Distribution of Unbalanced Sunshine Concrete Box Girder Based on ANSYS[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2020, 52(2): 207-212.
- [23] 陈拯. 太阳辐射对拱坝温度场的影响研究及其工程应用[D]. 北京: 清华大学, 2007.
CHEN Zheng. Effects of Solar Radiation on Thermal Analysis of Arch Dams and Engineering Application[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.
- [24] 朱劲松, 郭晓栋, 孟庆领. 高速铁路桥—轨系统精细温度场分析[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(4): 36-45.
ZHU Jin-song, GUO Xiao-dong, MENG Qing-ling. Analysis of Fine Temperature Field for Bridge-Track System of High-Speed Railway[J]. China Railway Science, 2019, 40(4): 36-45.
- [25] 尹冠生, 赵振宇, 徐兵. 太阳辐射作用下拱桥温度场研究[J]. 应用力学学报, 2014, 31(6): 939-944.
YIN Guan-sheng, ZHAO Zhen-yu, XU Bing. Study on the Thermal Field of Arch Bridge by Solar Radiation Action[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2014, 31(6): 939-944.
- [26] 刘红波, 樊泽源, 张智升. 典型金属结构太阳辐射非均匀温度作用计算方法[J]. 工业建筑, 2016, 46(11): 19-24.
LIU Hong-bo, FAN Ze-yuan, ZHANG Zhi-sheng. Calculation Method of Solar Radiation non-Uniform Thermal Load for Typical Metal Structure[J]. Industrial Construction, 2016, 46(11): 19-24.

责任编辑: 刘世忠