文章编号：2097-5899(2025)08-0026-08　　**中图分类号**：U294.3　　**文献标识码**：A
DOI：10.16669/j.cnki.issn.2097-5899.202410090002
引用格式：尹芊蔚，张洪雨，王军. 西部地区外部环境对集装箱内部温度场影响的实验分析[J]. 铁路物流，2025，43(8)：26-33.
YIN Qianwei，ZHANG Hongyu，WANG Jun. Experimental Analysis of External Environmental Influence on Internal Temperature Field of Containers in Western China[J]. Railway Logistics，2025，43(8)：26-33.

西部地区外部环境对集装箱内部温度场影响的实验分析

尹芊蔚[1,2]，张洪雨[3]，王　军[3]

(1. 兰州交通大学 交通运输学院，甘肃 兰州　730070；2. 兰州交通大学 高原铁路运输智慧管控铁路行业重点实验室，甘肃 兰州　730070；3. 中国铁路兰州局集团有限公司 货运部，甘肃 兰州　730000)

摘　要：为了探讨西部地区的集装箱内部的温度场影响因素，建立了集装箱内部流体的三维非稳态数学模型，通过仿真软件对内部温度场分布进行模拟，并利用试验验证了仿真结果，以大气温度和太阳辐射作为影响因子，对试验数据进行回归分析，研究空集装箱和载货集装箱在同一环境下内部温度场的分布。结果表明：大气温度是集装箱内部温度场的主要影响因素，其回归系数达0.9以上，太阳辐射作为箱壁的温度载荷也会造成局部的温度变化；内装货物的堆码方式也会造成箱内升温，仿真模拟数据和试验数据的误差范围在3 ℃以内，证明了所建立仿真模型的可行性，从而为集装箱运输保温隔热措施提供设计参考。

关键词：集装箱；铁路运输；温度场；耦合换热；回归分析

0　引言

随着铁路货运向现代物流转型发展[1]，集装箱货运逐渐成为我国主要的货物运输方式之一，2023年我国铁路完成集装箱运量7.91亿t，同比增长7.4%[2]。国务院印发的《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》提出要注重货运安全的问题，大力发展铁路集装箱运输。随着“一带一路”建设的深入推进，集装箱运输占比越来越高。铁路集装箱运输快速发展的同时，集装箱运输安全及质量问题也备受关注，由于货物运输场景多样、外部环境复杂多变[3]、装载货物品类繁多，且集装箱在运输过程为密闭箱体，在受到外部环境的影响下，其内部温度的变化更为剧烈，从而影响到所装运货物的质量与安全。尤其西部地区总面积大，货流节点分散，货物运距较其他地区更长，在运输途中以及集装箱临时存放时会面临诸多问题[4]。其中仍待解决的问题之一是由于西部地区太阳辐射强度大、海拔高和昼夜温差大等多方环境因素导致集装箱内部温度场不均衡，内部流场不稳定[5]，将对货物质量造成威胁，影响运输安全与效率。

在西部地区的集装箱温度场影响因素分析方面，田润良等[6]基于回归分析模型，对格尔木地区军用集装箱运输时各项外部环境条件分析得出大气温度与箱内温度的偏相关系数高达0.79左右；王春生等[7]基于仿真与试验结合方式，得出夏季西部干燥地区的危险货物集装箱箱内温度不超过60 ℃；尹芊蔚等[8]对集装箱内部温度场的研究现状、理论模型、计算方法等方面的国内外相关研究进行了综述，可以为集装箱多式联运安全防护和运输组织提供参考。在西部地区外部环境下对密闭箱体内部流场分析方面，薛飞等[9]研究了在西部高原高寒高强度太阳辐射环境条件下，采用辐射-对流的耦合传热模型计算箱体内温度场的分布；杨楠

收稿日期：2024-10-09
基金项目：甘肃省联合科研基金项目(24JRRA851)；中国铁路兰州局集团有限公司科技发展项目(2024013-1，2023006-1)

等[10]分析了西部地区环境影响下，集装箱采用不同的隔热材料时温度场的分布，得出聚氨酯材料的保温隔热性能较好；赵前等[11]分析了吐鲁番地区冷藏集装箱内部温度场分布，影响因素主要是太阳辐射和环境温度，且环境温度影响较大，箱体前部的边角处、送风口和太阳直射部位易产生局部高温。此外，针对集装箱内部流场的三维非稳态数学模型建模方面，赵春江等[12]采用CFD非稳态剪切压力传输k-ε模型，模拟了冷藏集装箱的内部流场分布；Kan等[13]利用N-S方程建立了冷藏集装箱性能失效后内部流体的运动方程，分析了货物和集装箱的传热关系。

根据既有研究成果可知，针对集装箱内部温度场的研究需建立多维度分析模型，首先应构建外部环境与箱体内部环境的热传递模型及空气动力学模型；其次对空箱、满载等不同装载工况下箱体内外壁面温度场变化规律展开对比研究；在此基础上，通过数值模拟与实验数据分析相结合的方法，分析得出各个影响温度场因素的相关系数。

综上所述，在高辐射高海拔的西部地区，影响集装箱内部温度场的环境因素主要为大气温度、太阳辐射2项环境因素的耦合，其他的环境因素影响较小。因此，研究通过结合仿真与试验的数据来综合分析基于某西部地区的大气温度和太阳辐射条件对集装箱内部温度场的影响，并通过回归分析来考虑2种环境因素的相关联程度。

1　集装箱温度场仿真模拟模型构建

研究以兰州地区的地理环境作为背景，兰州作为“一带一路”建设的重要物流节点，承担了大量的铁路集装箱仓储、转运等工作。通过对兰州地区某物流园区仓储的集装箱内部温度场环境进行仿真和试验，对比二者的误差，分析环境因素对集装箱内部温度场的影响程度。

1.1　几何模型

通用集装箱的规格技术参数选取20 ft集装箱，其外表面尺寸为6 058 mm×2 438 mm×2 591 mm，以集装箱的轴对称几何中心为三维坐标原点，其长度方向设为x轴，高度方向设为y轴，宽度方向设为z轴。研究的内装货物选取了铝合金钢架，单个铝合金钢架的规格长×宽×高为1 900 mm×550 mm×125 mm，沿集装箱三维坐标的x轴方向堆码3个，沿z轴方向堆码4个，沿y轴方向堆码10个，最后一体式堆码货物整体的规格长×宽×高为5 700 mm×2 200 mm×1 250 mm。空箱和半载箱分别选取5类测试点：①空箱的测试点分别为后侧壁面—测试点1，左侧壁面—测试点2，门壁面—测试点3，右侧壁面—测试点4，靠近门段的顶侧壁面—测试点5；②半载箱的测试点分别为靠近顶壁的门壁面—测试点a，以体积均分4份的1/4场且靠近顶壁—测试点b，1/2场靠近箱底位置—测试点c，3/4场位于x轴方向的轴对称线位置—测试点d，后侧壁面位于x轴方向的轴对称线位置—测试点e。仿真及试验的测试点坐标参数如表1所示。

表1　仿真及试验的测试点坐标参数

Tab.1　Coordinate parameters of test points for simulations and experiments in the study

参数对象	x轴/mm	y轴/mm	z轴/mm
空箱测试点1	−3 028	0	0
空箱测试点2	0	0	1 217
空箱测试点3	3 028	0	0
空箱测试点4	0	0	−1 217
空箱测试点5	3 027	1 293	−1 210
半载箱测试点a	3 028	0	0
半载箱测试点b	1 514	647	0
半载箱测试点c	0	−1 280	0
半载箱测试点d	−1 514	0	0
半载箱测试点e	−3 028	647	0

1.2　集装箱温度场热模型

1.2.1　集装箱表面折射温度

西部地区的太阳辐射相较于沿海、平原地区的辐射量要更大，集装箱作为钢质结构，容易受到温度载荷的影响产生表面升温，太阳辐射越强的地区，集装箱表面吸收的热量也就越高。研究需要基于兰州地区的太阳辐射量来计算出集装箱表面受辐射后折射的温度，结合大气温度来研究内部温度场的变化。Marino等[14]研究计算了室外建筑受太阳辐射后的折射温度，适合计算集装箱外箱壁以及地面受太阳辐射的折射温度公式，如式(1)—(4)所示。

$$q_e(t)=\frac{1}{R_{se}}\left[T_{sol-air}(t)-T_{se}(t)\right] \tag{1}$$

$$T_{sol-air}=T_e+\frac{\alpha I_t}{h_e} \tag{2}$$

$$I_t=I_D+I_d+I_{\text{earth}} \tag{3}$$

$$R_{se}=h_e^{-1} \tag{4}$$

式中：q_e为外部边界交换的热流量，W/m^2；R_{se}为建筑

外表面热阻，冬季取34.0，(m^2·℃)/W；h_e为集装箱壁面传热系数，W/(m^2·℃)；T_e为外部环境温度，℃；$T_{sol-air}$为等效太阳温度，℃；T_{se}为边界外表面温度，℃；α为建筑辐射吸收系数；I_D为垂直照射角度下太阳辐射的辐射量，W/m^2；I_d为水平方向太阳辐射的辐射量，W/m^2；I_{earth}为太阳辐射加载至地球地表的太阳辐射量，W/m^2；I_t为太阳总辐射量，W/m^2。

1.2.2　换热系数模型

通过换热分析计算出各材料的换热量，判断对流、传导换热量量级与辐射换热量量级之间的关系，如果二者相差不大，则考虑辐射换热，若前者远远大于后者，则辐射换热量可以忽略不计。西部地区的太阳辐射强度大，因此考虑根据郭志鹏等[15]研究采用的集装箱壁面换热系数计算公式，如式(5)所示，本研究主要考虑空气和集装箱外表面箱壁的换热。

$$\frac{1}{K}=\frac{1}{\alpha_1}+\sum\frac{\delta_1}{\lambda_1}+\frac{1}{\alpha_2} \tag{5}$$

式中：K为传热系数，W/(m^2·℃)；α_1为高原环境与外侧箱壁壁面的自然对流换热系数；α_2为箱体内壁壁面与内部空气气流对流换热系数；λ_i为各边界层导热系数，W/(m·℃)；δ_i为各边界层的厚度，mm。

1.2.3　热物性参数

集装箱是钢结构体，其主要由Q235碳素钢和不锈钢组成；研究的内装货物选取了铝合金钢架，相关热物性参数如表2所示。

2　集装箱温度场仿真模拟与试验验证

2.1　仿真模拟

2.1.1　边界处理

根据标准方程所需参数，为便于仿真软件的流体计算，对模型做出以下假设。

（1）简化集装箱模型，忽略表面凹槽中的流体流动以及忽略货物紧密叠放时微小间隙中的流体运动，便于计算网格的生成。

（2）假设空气流动符合Boussinesq假设，并设置空气密度为0.18 kg/m^3，空气膨胀系数为0.003 35/K。

（3）假设y轴(即集装箱高方向)方向为地心方向，取重力加速度－9.81 m/s^2。

（4）研究采用瞬态热分析。本研究将集装箱的6个箱壁和货物分别设立6个边界，并利用太阳折射温度计算给各个边界施加初始条件。在网格划分的方法中，可以运用仿真软件中的网格划分自动拓扑方法，使网格精度更加切合模型的仿真。其中网格单元精度为0.1 m，平均单元格表面积为0.367 17 m^2，网格增长率为1.2。

计算的初始环境温度以兰州地区2023年11月24日的天气为准，计算12：00—18：00每隔1 h的瞬态温度数据；流体仿真选用标准k-ε模型，该模型计算代价小、求解稳定，适用于大部分运输环境；采用仿真软件中的太阳辐射计算每隔1 h后太阳的辐射角度和辐射量，代入式(1)—(4)计算集装箱表面的折射温度；采用SIMPLE算法来分析求解高阶Navier-Stokes模型，迭代计算温度场的数值变化。

2.1.2　大气温度-太阳辐射耦合下仿真温度数据分析

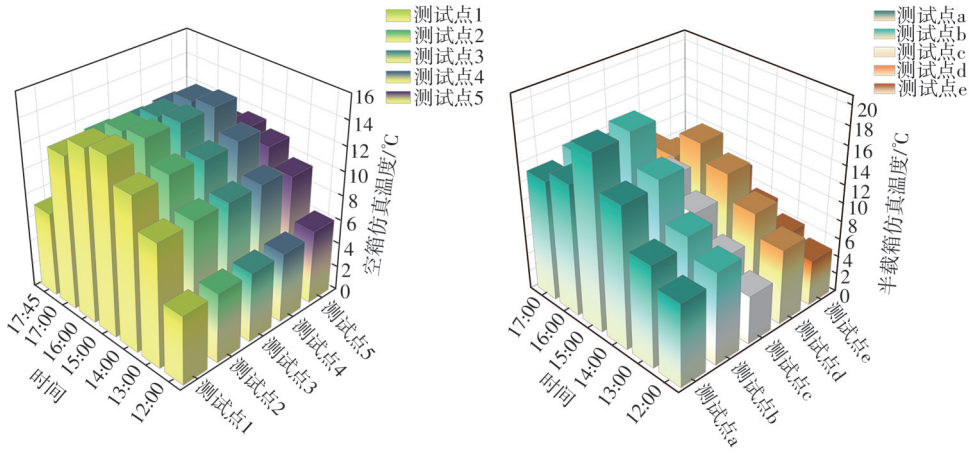
通过对空箱和半载箱的内部温度场仿真得到测试点的温度模拟数据值，可以了解各个壁面温度的变化幅度，仿真模拟中测试点温度场分布如图1所示。

结合图1所示，外界环境温度的变化与空箱内部温度场变化趋势相似，变化更为均匀；但半载箱内部温度场分布较不均匀。无论是空箱还是半载箱，靠近太阳直射壁面的测试点升温均较高。从图1a可以看出，不同的时间段集装箱温度差异明显，这进一步证明了箱内温度受外界环境温度的影响。并且顶壁温度较高，由上至下，温度在逐渐递减，温度场分布呈阶梯状态。但温度场变化较为均匀，箱内温差范围小，其各个时段的温差平均值在2 ℃以内，这表明外界环境温度对空箱内部温度的影响较小。从图1b可以看出，半载箱的箱内温差相较于空箱的箱内温差更大，半载箱内部的温度分布较为不均匀，尤其靠近前门太阳直射的货物温度较靠近其他箱壁的货物温度的温差平均有9 ℃。货

表2　相关热物性参数

Tab.2　Relevant thermo-physical parameters

换热边界	材料	导热系数/(W/(m·℃))	密度/(kg/m^3)	比热容/(J/(kg·℃))
集装箱外侧板、外门板、框架结构	Q235普通碳素钢	60.60	7 850.0	465
集装箱内侧板	HGSS不锈钢	15.00	7 750.0	500
瓦楞纸箱	纸板	0.30	1 000.0	2 580
铝合金钢板	铝	202.40	2 719.0	871



a 空箱仿真温度场分布
a Simulated temperature field distribution in empty box

b 半载箱仿真温度场分布图
b Temperature field distribution of half-loaded box simulation

图1　仿真模拟中测试点温度场分布

Fig.1　Temperature field distribution at test points in simulation

物外表的温度较高，而箱壁温度较低，这表明在半载状态下，密闭的箱体内流体运动更为复杂，且受太阳直射和货物装载状态的影响更为明显。

2.1.3　大气温度-太阳辐射耦合下仿真温度云图分析

半载箱货物在12：00—17：00时间段仿真温度场云图如图2所示，从图2a—图2f可以直观地看到，各个时间段货物表面的高温、低温分布都略有不同，但是高温还是分布在堆码货物的顶壁，呈现不均匀分布，导致货物产生温度分布不均匀的现象。且12：00—13：00外界大气温度较高，货物的侧壁也产生了局部高温，但随着大气温度的降低，内部货物的温度也随着下降，侧壁的温度下降略快。

仿真云图证明了集装箱内部温度场和内装货物是受到了太阳辐射和大气温度的耦合影响，集装箱的顶壁(y轴正方向壁)、前门端(x轴正方向壁)和左侧壁端(z轴正方向壁)受到了太阳直射，因此靠近这些箱壁堆码的货物都产生了局部高温，其温度分布并不均匀，可以得出太阳辐射和大气温度的耦合影响会导致货物产生局部高温。

2.2　试验验证

2.2.1　试验方案设计

为了对仿真数据进行更好的预测，采取对实际堆码集装箱内部温度场的分布进行试验研究。试验地点选择在兰州某物流园区，试验对象采用20 ft通用铁路集装箱，分别对半载箱和空箱的内部温度场进行测验，设备采用传感温湿度的探测仪。以仿真的测试点坐标参数，在实际的集装箱内进行坐标1∶1还原来布置温湿度传感器，在空箱试验时，相较于仿真试验，在集装箱门端顶壁多布置了一个测试点，在试验中记为6号测试点。

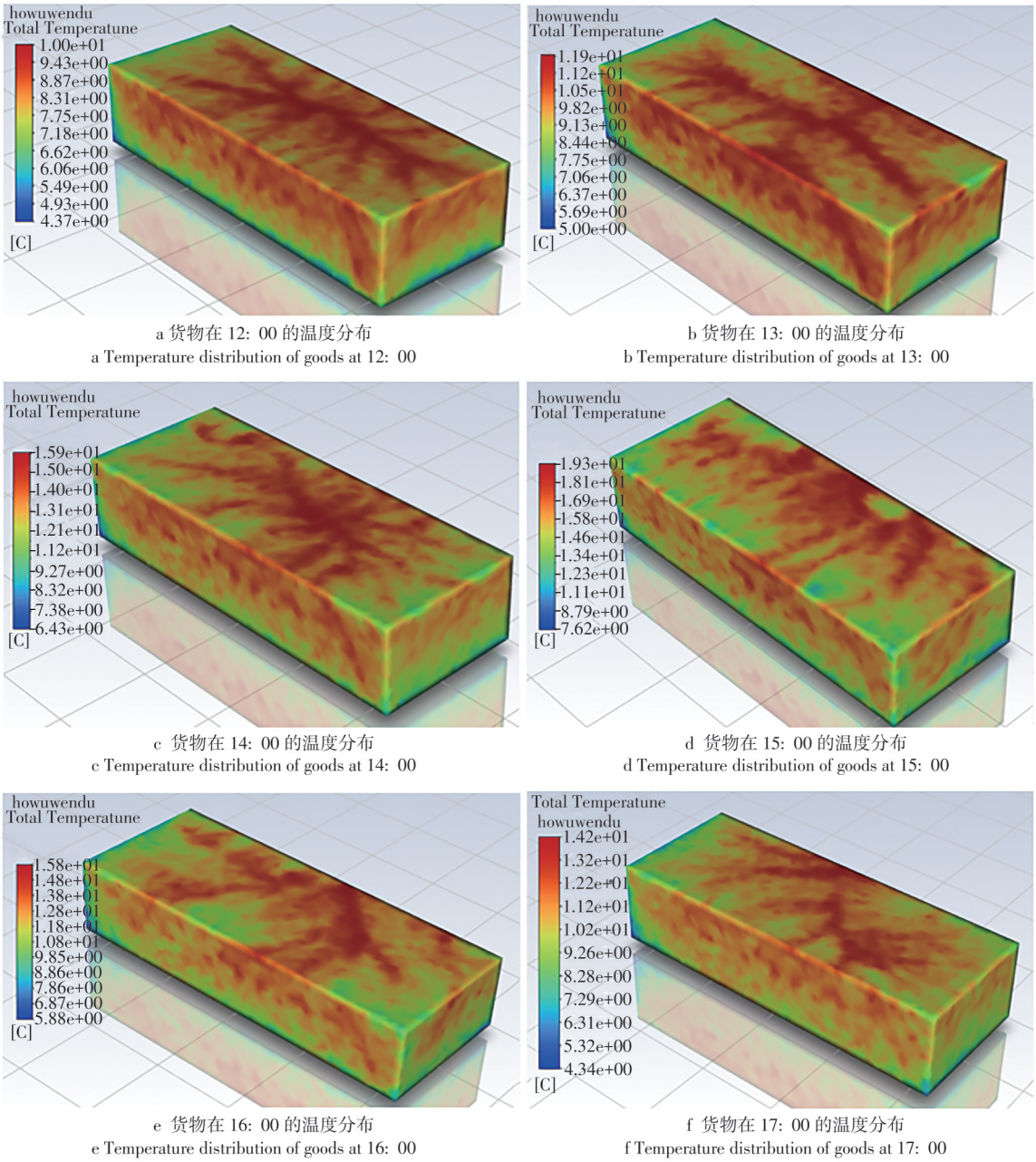
2.2.2　大气温度-太阳辐射耦合下试验温度数据分析

经过12：00—18：00 6 h的测验，温度传感器每隔2 min实时上传一次温湿度数据，空箱数据选取12：00—17：00每整点以及17：45的7组数据；半载箱数据选取12：00—17：00每整点的6组数据，进行三维统计绘图，试验中测试点温度场分布如图3所示。图3可以直观看到箱内温度场在6 h内的温度变化。

从图3a可以看出，试验中空箱的温度场分布，6号测试点为集装箱外表面的温度，要较高于箱内的温度，箱内的温度场与仿真得出的温度场分布相似，都是从顶壁向下，温度依次递减。从图3b可以看出，试验中半载箱的温度场分布，其内外部温差也较大，对比测试点a和测试点e工况的温差，最大温差产生在14：00，温差有12 ℃。试验结果与仿真结果相类似，都是在靠近太阳直射壁面的测试点升温更明显，但试验得出的箱内温差要比仿真结果的箱内温差略高，与仿真结果得出的温差相差在2 ℃以内。

2.2.3　大气温度-太阳辐射耦合与箱内温度分布的回归分析

根据已有研究以及本次仿真和试验数据，大气温度和太阳辐射是影响集装箱内部温度场变化的关键因素。大气温度作为环境温度，直接影响集装箱内外温度的热交换过程；而太阳辐射则通过直射和散射作用，对集装箱壁面进行加热，进而影响箱内温度分布。因此确定大气温度、太阳辐射作为回归分析的自变量组，箱内温度作为应变量组进行线性回归，由此确定环境



a 货物在 12：00 的温度分布
a Temperature distribution of goods at 12：00

b 货物在 13：00 的温度分布
b Temperature distribution of goods at 13：00

c 货物在 14：00 的温度分布
c Temperature distribution of goods at 14：00

d 货物在 15：00 的温度分布
d Temperature distribution of goods at 15：00

e 货物在 16：00 的温度分布
e Temperature distribution of goods at 16：00

f 货物在 17：00 的温度分布
f Temperature distribution of goods at 17：00

图2　半载箱货物在12：00—17：00时间段仿真温度场云图

Fig.2　Semi-loaded box cargo simulation temperature field between 12：00—17：00

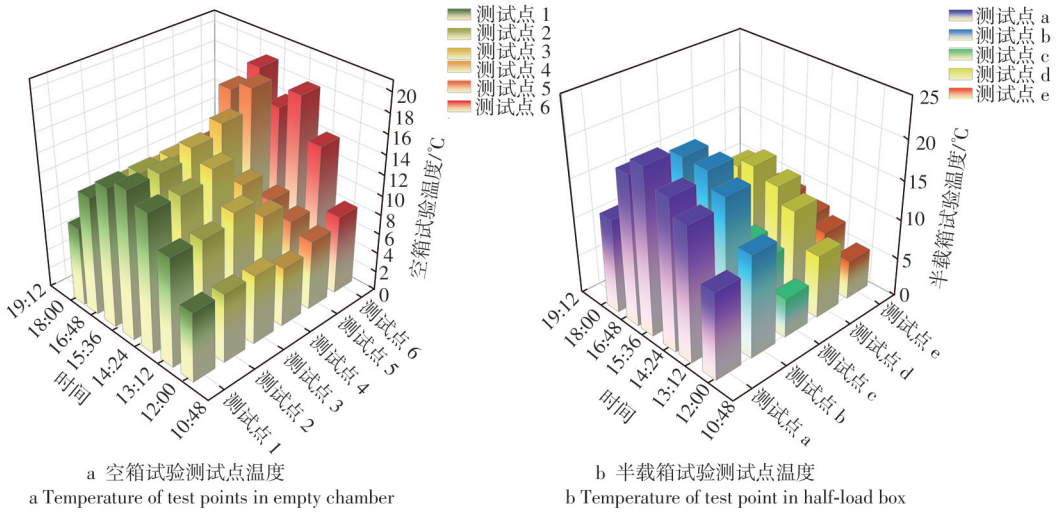
因素与箱内温度场的等效线性关系。基于多元线性回归方法，假设拟合的多元线性方程为式(7)。

$$Y=\alpha_0+\alpha_1 x_1+\cdots+\alpha_n x_n \tag{7}$$

式中：Y为因变量；x_i为自变量；α_i为回归方程系数，其中统计量选取R^2(R为温度和太阳辐射与集装箱内部温度的相关系数)；F值概率ρ，当$\rho<a$时，回归模型有效(a为显著性水平，一般取0.05)。

基于以上方法，对试验数据的空箱和半载箱中试验的各个测试点受大气温度和太阳辐射作为自变量的影响情况进行分析，得出各个试验点的温度与大气温度、太阳辐射的回归系数，试验结果回归分析相关参数雷达图如图4所示。

从图4a数据可知，空箱测试点5的线性拟合相关系数和半载箱下测试点e的线性拟合系数均小于0.9，认为其与环境的相关较低，但回归模型有效。而箱内其余测试点与环境因素的线性拟合相关系数均为0.9以上，相关度很高，且回归模型有效。在空箱条件下，测试点1为箱体前箱壁温度数据，试验条件为前侧开门

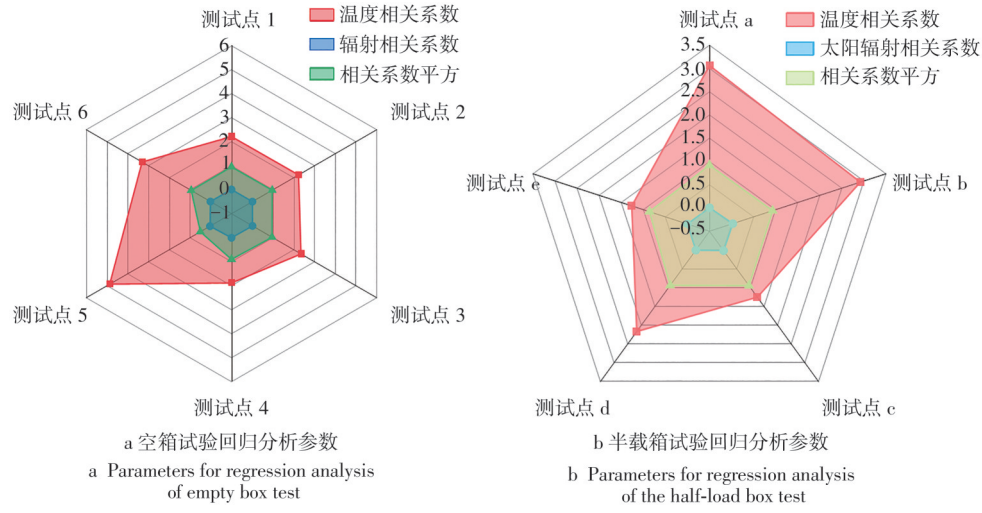


a 空箱试验测试点温度
a Temperature of test points in empty chamber

b 半载箱试验测试点温度
b Temperature of test point in half-load box

图3　试验中测试点温度场分布

Fig.3　Temperature field distribution at test points during the test



a 空箱试验回归分析参数
a Parameters for regression analysis of empty box test

b 半载箱试验回归分析参数
b Parameters for regression analysis of the half-load box test

图4　试验结果回归分析相关参数雷达图

Fig.4　Radar plot of parameters relevant to regression analysis of test results

处箱壁直对太阳辐射，后侧箱壁位于背阴处，其回归相关系数高达0.95，相关度很高；而测试点5的温度数据为1/2场箱底地面温度场，其受环境影响最小，与环境因素相关系数仅0.5，相关度低。由分析可知，当直接接触外界环境，箱内温度场变化受到环境的影响程度较大；如测试点2与测试点4分别为左右侧壁面温度场分布，由于试验环境的集装箱连续堆码一排，因此左右侧壁温度场变化与环境的相关度近似为0.94左右。从空箱状态各个测试点与环境因素的回归系数大小来看，大气温度对箱内温度场的影响因素较大。

由图4b可知，半载箱测试点e相关系数较小，其位于后侧壁面背阴处，没有直接接受太阳辐射，因此测试点e大气温度和太阳辐射呈负相关。测试点c即1/2靠地面处的温度场分布和测试点d即靠近后侧壁面3/4场的温度场分布，与测试点e的试验条件类似，为间接接触太阳辐射，其大气温度与太阳辐射均呈负相关。测试点d处于3/4场的中高位温度场，其大气温度的相关系数为2.166；测试点c处于靠近地面的温度场，其大气温度的相关系数为1.254 5，与仿真的结果类似，越靠近太阳直射部位的温度场分布，与大气温度的相关程度更高。

2.3　仿真和试验数据耦合分析

由试验数据的回归分析可得，兰州地区直接受太阳辐射导致箱壁升温的温度场分布与环境因素的相关度很高，而没有直接接触外界环境的箱内温度场分布与环境因素的相关度较低。从温度场分布结果来看，

和仿真结果近似，整体温度变化都是由箱体顶部到箱底递减变化。

空箱仿真结果在各个时段下略小于试验结果，除了测试点5，其他测试点误差在0.5～1 ℃以内，测试点5的误差平均值在2.5 ℃以内，仿真和试验各个时间段误差平均值示意图如图5所示。

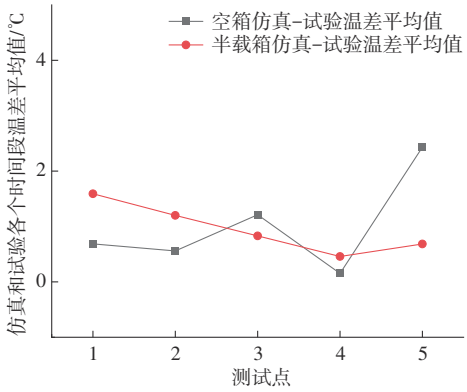


图5　仿真和试验各个时间段误差平均值示意图

Fig.5　Schematic representation of the average value of the error for each time period of simulation and test

半载箱仿真结果和试验结果的差距，各个时间段温差的平均值在0.4～3 ℃以内。其各个测试点仿真和试验的温度差较小，可以相互提供支撑。

空箱的仿真和试验的温度分布对比，测试点e的温差2.43 ℃，相较于其他测试点的温差略高。半载箱的仿真和试验的温度分布对比，测试点a和b的温差较大，测试点a的温差为2.93 ℃，测试点b的温差为2.02 ℃。

3　结论

针对西北地区气候条件下的集装箱内部温度场研究，揭示了影响温度分布的关键因素，总结了气候特征与箱内温度场的关系变化，具体结论如下。

（1）通过探讨兰州某货场露天堆放集装箱内部温度场的主要影响因素及其分布规律，得出集装箱内部温度场主要受大气温度影响，表现为顶壁温度显著高于其他壁面，受太阳直射壁面温度高于非直射部位，而箱底底面温度最低。据此，针对实地运输与仓储条件，来研究集装箱顶壁的保温隔热措施。

（2）空箱和半载箱在同一运输环境下，半载箱内部的升温更高，相较于空箱内部的温度会高出2～5 ℃。仿真和试验结果显示空箱壁面平均温度差为3 ℃，而半载箱壁面与货物表面平均温度差达7.5 ℃。货物堆码方式显著影响箱内流体运动，导致温度变化加剧。因此，建议在实际运输中优化货物堆码设计，以分散外界温度和太阳辐射产生的局部热源，有效预防货物局部高温现象。

（3）集装箱内部整体升温取决于大气温度，太阳辐射会影响集装箱壁面的热量吸收，特别是在太阳直射部位易产生局部高温。太阳辐射和大气温度耦合导致集装箱内部的局部高温现象，大气温度和箱内温度变化的回归关联系数达0.9以上，且太阳直射箱壁处温度场变化与大气温度的关联系数更高。

（4）兰州属于黄土高原地区，太阳辐射强、气候干燥，研究采用的集装箱内部流体模型的仿真结果与实地测试结果耦合较好，建立的集装箱仿真流体模型可以为集装箱运输隔热措施方案等提供依据。

参考文献：

[1] 李　杰，潘　贺. 铁路货运向现代物流转型升级探讨[J]. 铁道货运，2024，42(10)：1-6.
LI Jie，PAN He. Discussion on Transformation and Upgrading of Railway Freight Transport to Modern Logistics[J]. Railway Freight Transport，2024，42(10)：1-6.

[2] 国家统计局.2023年中国统计年鉴[M]. 北京：中国统计出版社，2023年.

[3] 白芝珍，匡海波，杨　俊. 中国铁路集装箱运输网络演化特征研究[J]. 人文地理，2024，39(2)：133-144.
BAI Zhizhen，KUANG Haibo，YANG Jun. Evolution Characteristics of China's Railway Container Transportation Network[J]. Human Geography，2024，39(2)：133-144.

[4] 张　野，韩　峰. 基于GIS的西北地区铁路路网扩张规律研究[J]. 铁道标准设计，2017，61(10)：57-60.
ZHANG Ye，HAN Feng. Research on the Rules of Railway Network Expansion in Northwest Region Based on GIS[J]. Railway Standard Design，2017，61(10)：57-60.

[5] 何　璇，雷　波. 高寒地区槽式太阳能集热器与CO_2热泵复合采暖系统的优化研究[J]. 制冷与空调(四川)，2019，33(1)：6-10.
HE Xuan，LEI Bo. Optimization Research of Combining Parabolic Trough Collectors and CO_2 Air-Source Heat Pump Heating System in Alpine Region[J]. Refrigeration & Air Conditioning，2019，33(1)：6-10.

[6] 田润良，赵世宜. 格尔木地区集装箱内部温度-湿度条件研究[J]. 环境技术，2004，22(5)：3-6.
TIAN Runliang，ZHAO Shiyi. The Research of Temperature and Humidity Conditions Inside Container in Geermu Areas[J]. Environmental Technology，2004，22(5)：3-6.

[7] 王春生，滕　帅，王晓慧. 危险货物集装箱传热数值分析[J]. 铁道学报，2008，30(1)：13-18.
WANG Chunsheng，TENG Shuai，WANG Xiaohui. Numerical Analysis of Heat Transfer of Dangerous Goods Container[J]. Journal of the China Railway Society，2008，30(1)：13-18.

[8] 尹芊蔚，张玉召，邓雨露，等. 集装箱运输环境与其内部温度场耦合关系研究综述[J]. 铁道运输与经济，2024，46(10)：98−111.
YIN Qianwei，ZHANG Yuzhao，DENG Yulu，et al. Review of Coupling Relationship between Container Transportation Environment and Its Temperature Field[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(10)：98−111.

[9] 薛　飞，曲　燕，崔运静，等. 车载面包烤箱内温度场均匀性研究[J]. 工业加热，2022，51(2)：10−15.
XUE Fei，QU Yan，CUI Yunjing，et al. Study on Uniformity of Temperature Field in Vehicle-Mounted Bread Oven[J]. Industrial Heating，2022，51(2)：10−15.

[10] 杨　楠，尹芊蔚. 通用集装箱隔热措施温度场仿真及特征分析[J]. 铁道货运，2024，42(7)：53−62.
YANG Nan，YIN Qianwei. Simulation and Characterization of Temperature Fields for General-Purpose Container Insulation Measures[J]. Railway Freight Transport，2024，42(7)：53−62.

[11] 赵　前，张玉召，尹芊蔚，等. 空箱状态下冷藏集装箱速度场和温度场的耦合模拟[EB/OL]. (2025−01−11)[2025−05−08].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1949.U.20250331.1951.002.html.
ZHAO Qian，ZHANG Yuzhao，YIN Qianwei，et al. Coupled Simulation of Velocity and Temperature Fields of Empty Refrigerated Containers[EB/OL]. (2025−01−11) [2025−05−08]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1949.U.20250331.1951.002.html.

[12] 赵春江，韩佳伟，杨信廷，等. 基于CFD的冷藏车车厢内部温度场空间分布数值模拟[J]. 农业机械学报，2013，44(11)：168−173.
ZHAO Chunjiang，HAN Jiawei，YANG Xinting，et al. Numerical Simulation of Temperature Field Distribution in Refrigerated Truck Based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2013，44(11)：168−173.

[13] KAN A K，WANG T Z，ZHU W B，et al. The Characteristics of Cargo Temperature Rising in Reefer Container under Refrigeration-Failure Condition[J]. International Journal of Refrigeration，2021，123：1−8.

[14] MARINO B M，MUÑOZ N，THOMAS L P. Calculation of the External Surface Temperature of a Multi-Layer Wall Considering Solar Radiation Effects[J]. Energy and Buildings，2018，174：452−463.

[15] 郭志鹏，阚安康，杨　帆，等. 布置真空绝热板的冷藏集装箱内温度分布[J]. 南京航空航天大学学报，2017，49(1)：29−33.
GUO Zhipeng，KAN Ankang，YANG Fan，et al. Temperature Distribution Inside Reefer Container Equipped with Vacuum Insulation Panels[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics，2017，49(1)：29−33.

（责任编辑：金　晶）

Experimental Analysis of External Environmental Influence on Internal Temperature Field of Containers in Western China

YIN Qianwei[1,2]，ZHANG Hongyu[3]，WANG Jun[3]

(1. School of Traffic and Transportation，Lanzhou Jiaotong University，Lanzhou 730070，Gansu，China；2. Key Laboratory of Railway Industry on Plateau Railway Transportation Intelligent Management and Control，Lanzhou 730070，Gansu，China；3. Department of Freight，China Railway Lanzhou Group Co.，Ltd.，Lanzhou 730000，Gansu，China)

Abstract: In order to explore the influencing factors of the temperature field inside containers in western China, a three-dimensional unsteady mathematical model of the fluid inside the container was established. Simulation software was used to simulate the internal temperature field distribution, and experimental verification was conducted to validate the simulation results. Atmospheric temperature and solar radiation were considered as influencing factors, and regression analysis was performed on the experimental data. The distribution of the internal temperature field of empty and loaded containers under the same environmental conditions was studied. The results show that atmospheric temperature is the main influencing factor of the internal temperature field of the container, with a regression coefficient of above 0.9. Solar radiation, as a thermal load on the container wall, also causes local temperature changes. The stacking method of the cargo inside the container can lead to a temperature rise. The error between simulation and experimental data is within 3 ℃, proving the feasibility of the established simulation model. This provides a design reference for thermal insulation measures in container transportation.

Keywords: Container; Railway Transportation; Temperature Field; Coupled Heat Transfer; Regression Analysis