

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.04.019

## 温度-荷载耦合场下机场跑道剩余寿命评价模型

张宇辉<sup>1</sup>, 赵媛媛<sup>1</sup>, 顾欣<sup>2</sup>

(1. 中国民航大学交通科学与工程学院, 天津 300300; 2. 中智航科(天津)技术有限公司, 天津 300300)

**摘要:** 针对道面板在飞机荷载与温度耦合场复合作用下的道面寿命问题, 首先, 通过试验准确测量基于道面板深度的温度分布情况, 得出了不同厚度道面板最大温度梯度推荐值, 确定了仿真温度场加载参数。然后, 在大量仿真试验分析的基础上, 开展土基模量、道面板厚度和温差因素对道面板内应力的敏感性影响分析, 建立温度应力与温差相关性关系模型, 并通过实例验证其有效性。最后, 在道面板临界荷位处进行飞机与温度耦合仿真加载试验分析, 结果表明温度梯度和飞机荷载共同作用下产生的耦合应力小于温度翘曲应力和荷载应力的叠加之和, 两者相差 4.93%。基于荷载和温度耦合作用下的应力损伤累积原理, 计算道面剩余容许作用次数, 构建耦合场下道面剩余寿命评价模型, 并进行实例应用。

**关键词:** 道路工程; 水泥混凝土道面; 温度应力; 修正系数; 道面寿命

中图分类号: U416

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2023)04-0725-09

## Residual Life Evaluation Model for Airport Runway Under Coupled Temperature-Load Fields

ZHANG Yuhui<sup>1</sup>, ZHAO Yuanyuan<sup>1</sup>, GU Xin<sup>2</sup>

(1. College of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Zhongzhi Intelligent Aviation Technology Tianjin Co., Ltd, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** For the life calculation of pavement under the combined action of aircraft load and temperature coupling field, the recommended values of the maximum temperature gradient of pavement with different thicknesses are obtained through the accurate measurement of the temperature distribution based on the pavement depth. The loading parameters of the simulated temperature field are determined. Based on the analysis of a large number of simulation tests, the sensitivity of soil modulus, pavement slab thickness, and temperature difference factors to the stress on the pavement slab is analyzed. The correlation model between temperature stress and the temperature difference is established, and its effectiveness is verified through examples. The simulation load test analysis of aircraft and the temperature coupling is conducted at the critical load level of the pavement. The results show that the coupling stress generated under the combined action of temperature gradient and aircraft load is less than the sum of temperature warping stress and load stress, with a difference of 4.93%. Based on the principle of stress damage accumulation under the coupling action of load and temperature, the residual allowable number of actions of pavement is calculated, the pavement residual life evaluation model under the coupling field is constructed, and an example is applied to provide a theoretical reference for improving the relevant research in the field of pavement structure design.

**Key words:** road engineering; cement concrete pavement; temperature stress; correction factor; pavement life

**基金项目:** 天津市教委自然科学基金计划项目(2018KJ245)。

**收稿日期:** 2022-10-19; **修订日期:** 2023-05-15

**通信作者:** 赵媛媛, 女, 硕士研究生, E-mail: yuanyuan\_zhao2022@163.com。

**引用格式:** 张宇辉, 赵媛媛, 顾欣. 温度-荷载耦合场下机场跑道剩余寿命评价模型[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(4): 725-733. ZHANG Yuhui, ZHAO Yuanyuan, GU Xin. Residual life evaluation model for airport runway under coupled temperature-load fields[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(4): 725-733.

随着民航行业的快速发展,现有的跑道设计使用年限往往不能保质保量地满足机场的需求<sup>[1]</sup>。机场跑道道面在使用过程中持续受到不同机型的飞机荷载、自然环境等因素的影响。伴随着各种因素反复、持续的作用,道面逐渐出现破损现象,最终道面板寿命终结。自然因素的影响伴随着道面板整个服役期,且无时无刻不在发生温度的变化,现有研究表明温度应力对道面板的影响作用不容忽视,因此对机场道面板在自然环境(温度荷载)作用下的影响分析十分迫切。

关于水泥混凝土在荷载作用下受到的应力分析,通过几个阶段的不断研究以及修正,现已有较为完善的理论,现阶段最常用的为弹性地基理论。而水泥混凝土在温度荷载作用下相较于荷载作用下受到的应力更为复杂,现阶段还未能形成相对完善的理论,现有研究主要围绕着分析水泥混凝土道面温度的变化情况与温度应力的计算。郭超等<sup>[1]</sup>利用自由板理论得出预应力混凝土路面板的温度应力及预应力筋分担的温度应力;Abraham等<sup>[2]</sup>研究了混凝土路面的温度与应力变化,以二次形式表示温度曲线;Nishizawa等<sup>[3]</sup>基于温度预测与有限元法提出并验证了一种混凝土路面温度应力的计算方法。机场道面温度应力研究主要集中于在温度应力作用下完善道面板设计规范。刘建伟等<sup>[4]</sup>通过实测温度探究温度应力敏感性因素及其影响规律;付建峰等<sup>[5]</sup>在探究道面使用过程中的温度应力的同时也探究了混凝土浇筑过程中产生的温度应力。大量研究指出应考虑温度-荷载耦合作用的影响<sup>[6-8]</sup>,但现有机场道面设计计算中尚未考虑温度应力对道面板疲劳损耗的影响。为进一步对机场道面的使用寿命做出更准确的预测,基于在道面日常运行的荷载场和环境温度循环作用的温度场的耦合作用下,对机场道面寿命做出综合的评价与预测。

## 1 基于温度场的仿真模型

### 1.1 温度翘曲应力的理论解

水泥混凝土道面板结构在飞机轮载和自然环境的共同作用下被破坏,导致道面板承载能力降低。自然环境温度因素的变化使道面板膨胀或收缩,道面板在自重、地基反力和相邻道面板的约束作用下产生翘曲应力。

根据 Westergaard 温度应力计算公式,考虑温度梯度在板内非线性分布,有限尺寸道面板的翘曲应力的计算公式为<sup>[9]</sup>

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E\alpha\Delta t}{2(1-\mu^2)}(C_x + \mu C_y) \cdot D_x \\ \sigma_y = \frac{E\alpha\Delta t}{2(1-\mu^2)}(C_y + \mu C_x) \cdot D_x \end{cases} \quad (1)$$

式中: $E$ 为混凝土的弹性模量; $\alpha$ 为混凝土的线性膨胀系数,取 $1 \times 10^{-5}$ ; $\Delta t$ 为板顶与板底温度差; $\mu$ 为混凝土的泊松比; $C_x$ 、 $C_y$ 为 $x$ 、 $y$ 方向的翘曲应力系数。

$$C_{x,y} = 1 - \frac{\sinh \beta \cos \beta + \cosh \beta \sin \beta}{\cos \beta \sin \beta + \sin \beta \cosh \beta} \quad (2)$$

$$\beta_{x,y} = \frac{\sqrt{2} L_{x,y}}{4l} \quad (3)$$

$$D_{x,y} = 1.77e^{-4.48\beta} C_{x,y} - 0.131(1 - C_{x,y}) \quad (4)$$

式中: $L_{x,y}$ 为道面板尺寸; $L$ 为相对刚度半径; $\beta$ 表示道面板尺寸与相对刚度半径的比值关系; $C_{x,y}$ 为道面板翘曲应力系数; $D_{x,y}$ 为考虑温度梯度非线性分布的温度内应力系数。

### 1.2 道面有限元模型

机场道面板有限元模型的建立现已较为成熟,选择合适的参数可得到有效结果。实际道面的基层、土基层与道面板为层状结构综合体系,共同承担荷载,虽然温度应力只对道面产生变形翘曲等影响,但其下部的土基层也会对道面板的温度变形产生影响。基于此,为使模型与实际机场跑道受力状态相符,在建立道面结构有限元模型时采用弹性层状理论体系。

#### 1.2.1 有限元模型

道面板尺寸为 $4.5 \text{ m} \times 5.0 \text{ m} \times 0.38 \text{ m}$ ,基层、土基尺寸为 $13.5 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ 。土基、基层和面层均采用三维六面体实体单元<sup>[10-11]</sup>,各层单元类型均为热传递实体单元,与热传递相关的参数以及道面结构参数具体见表1。按跑道实际力学响应情况设置基层与土基黏结,道面板和基层切向摩擦系数取值为 $0.6$ <sup>[12]</sup>。由于每块道面板均受到周围其他板的

表1 道面结构参数及各层热传递相关参数

Table 1 Pavement structure parameters and heat transfer parameters

参数	水泥混凝土土面层	水泥稳定碎石基层	土基
厚度/m	0.38	0.40	10
弹性模量/MPa	36 000	1 500	90
密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	2 500	2 000	1 800
泊松比	0.15	0.25	0.35
比热容/[ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ ]	960	910	1 040
热传导系数/( $^\circ\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$ )	8 000	6 700	6 300
线膨胀系数/( $^\circ\text{C}^{-1}$ )	$1 \times 10^{-5}$	$9.8 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-6}$

影响作用,为探究道面板在温度、飞机荷载作用下产生的应力,根据现有研究<sup>[13]</sup>,选用12块板三维实体道面模型,如图1所示,用中间两块板来研究道面板在荷载作用下产生的应力和影响,其余10块板用于构建中心两块板的约束环境,更符合机场跑道道面板的实际受力情况,可得到更为精准的计算结果。按规范要求布设传力杆和横、纵缝,相邻道面板间接缝采用刚度量化的传力杆进行传荷,接缝刚度为104 MN/m<sup>2</sup>,模型四周设置x、y两个方向的约束,底部设置3个方向的约束<sup>[11,14]</sup>。

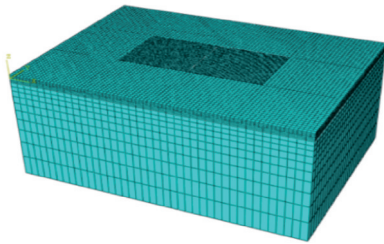


图1 有限元模型

Fig.1 Finite element model

1.2.2 飞机荷载

A320和B737-800为国内常用机型,使用这两种机型实现飞机荷载的施加。飞机荷载通过机轮传递到道面上,主起落架承担90%以上的荷载,飞机的单轮荷载 $P$ 是通过主起落架分配系数计算的,表达式为

$$P = \frac{\rho G}{m} \quad (5)$$

式中: $\rho$ 为主起落架荷载分配系数; $G$ 为飞机荷载,通常采用飞机最大起飞重量(kN); $m$ 为主起落架的总机轮个数。

在设计计算过程中通常将飞机轮印假定为组合型轮印,考虑仿真的计算速度和精度,根据荷载面积等效原则,将组合型轮印简化为矩形轮印<sup>[14]</sup>,如图2所示。两种机型的主起落架构型如图3所示。根据式(5~7)计算两种机型的飞机荷载参数,如表2所示。

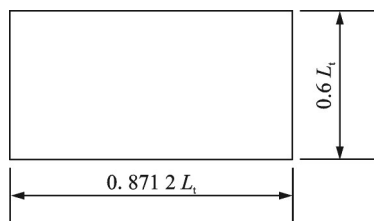


图2 简化矩形轮印示意图

Fig.2 Schematic diagram of simplified rectangular wheel print

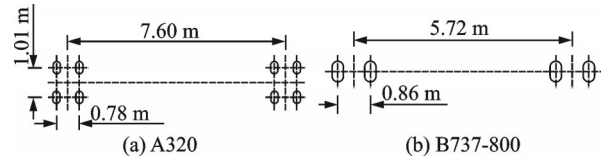


图3 主起落架构型

Fig.3 Main gear configuration

表2 各机型参数

Table 2 Aircraft parameters

参数	机型	
	A320	B737-800
最大起飞重量/kN	770.00	790.04
主起落架荷载分配系数	0.95	0.95
主起落架个数	2	2
主起落架间距/m	7.60	5.72
主起落架构型	双轴双轮	单轴双轮
主起落架轮距/m	0.78/1.01	0.86
主起落架胎压/MPa	1.14	1.47
主起落架单轮荷载/kN	91.44	184.67
主起落架轮印面积/m <sup>2</sup>	0.080	0.126
主起落架轮印长度/m	0.392	0.490
0.871 2L <sub>t</sub> /m	0.341	0.427
0.6L <sub>t</sub> /m	0.235	0.294

轮印面积计算公式为

$$A = \frac{P}{1\,000q} \quad (6)$$

$$L_t = \sqrt{\frac{A}{0.5227}} \quad (7)$$

式中: $A$ 为单个飞机轮印面积; $q$ 为飞机轮胎胎压; $L_t$ 为轮印长度。

当飞机荷载作用于临界荷位时,道面板内产生最大应力,A320和B737-800在道面板上的临界荷位<sup>[14]</sup>如图4所示。

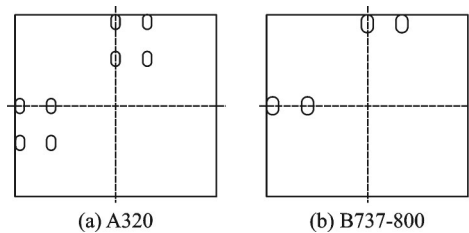


图4 不同机型临界荷位示意图

Fig.4 Critical load position

1.3 温度场梯度试验

1.3.1 温度场梯度试验设计

温度梯度作用于道面板时,道面板因上下表面的温度差而产生翘曲应力,为了更准确地模型中加载温度场,需确定温度场的梯度参数。为了明确温度梯度的变化,在实验室设计试验,依据试验参数分析整个道面板温度以及梯度的变化特点,为仿真加载奠定基础。

目前中国机场道面的相关设计规范中尚未考虑温度应力对道面板的影响,而公路路面设计中已规定了温度应力影响的相关计算。由于中国各地区自然环境差异大,当不能采用实际测量手段时可参考公路中规定的各自然划区的温度梯度最大值  $T_g^{[15-16]}$ ,如表3所示。

表3 温度梯度计算值

Table 3 Calculated values of temperature gradient

公路自然区划	II、V	III	IV、VI	VII
$T_g/(\text{°C}\cdot\text{m}^{-1})$	83~88	90~95	86~92	93~98

表3中是22 cm厚水泥混凝土道面板的最大温度梯度计算值,而机场道面板厚度常选用28~40 cm之间,温度梯度与板厚的关系呈非线性,因此仅依靠修正系数并不能准确反映真实情况,通常采用修正系数  $\alpha_h$  进行修正,不同厚度道面修正系数  $\alpha_h$  取值如表4所示。

表4 温度梯度修正系数

Table 4 Temperature gradient correction factor

道面厚度/cm	28	32	24	36
$\alpha_h$	0.84	0.79	0.94	0.67

为便于分析,将板深度方向的非线性温度梯度按照弯曲等效转换为等效线性温度梯度。为明确温度场的变化规律,设计试验进行研究。在实验室浇筑45 cm×50 cm×38 cm道面板,10 cm厚基层,板内布置温度传感器(图5),为减小误差在不同深度设置3条平行测温线,分别测量水泥混凝土道面板上表面以下深度每增加6 cm处温度数据,不同深度处温度的取值采用3个传感器监测结果的平均值,并在道面板四周粘贴保温层,避免温度散失。

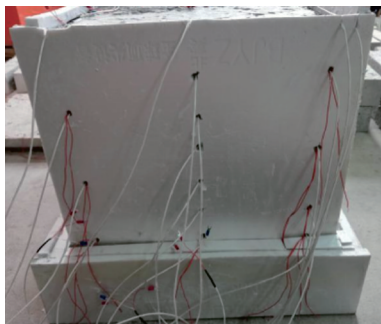


图5 模型浇筑图

Fig.5 Model pouring diagram

### 1.3.2 温度场梯度参数

温度随深度变化的关系如图6所示,对测量数据进行相关性分析。依据相关性系数  $R^2=0.996$  可知较好地反映了实际温度分布情况。

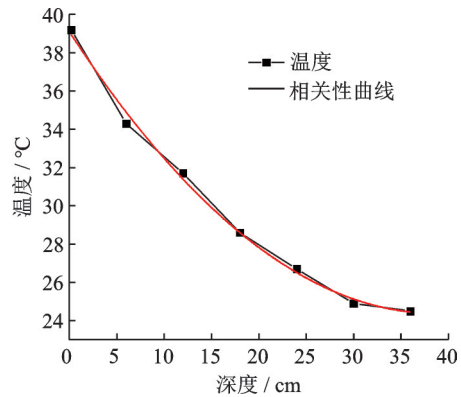


图6 温度随深度分布图

Fig.6 Temperature distribution with depth

温度随道面板深度变化的关系式为

$$T(h) = 0.0101h^2 - 0.7760h + 39.2623$$

$$0 < h \leq 38 \quad (8)$$

结合试验数据与关系式分析道面板厚度变化时温度梯度的变化规律,给出了不同板厚的最大温度梯度的推荐值,如表5所示。通过温度梯度的计算,在仿真模型中对温度应力作用进行修正,依据式(8)设置温度随深度的变化规律。同时由于在温度传导过程中,整块板厚并非产生最大温度梯度值,故在仿真过程中,采用的温度梯度范围为20~60 °C/m。

表5 不同板厚II区最大温度梯度计算值

Table 5 Calculation value of maximum temperature gradient in Zone II of different plate thicknesses

板厚/cm	28	32	36	38
$T_g/(\text{°C}\cdot\text{m}^{-1})$	54	48	44	42

## 2 板内温度应力敏感性分析

根据翘曲应力的计算公式,考虑到道面结构的实际受力状态,道面板的温度应力与板的尺寸和板厚、土基层的地基模量和温度差相关。为进一步明确各参数对温度应力的影响机理,此模块将对温度应力进行影响性分析。

### 2.1 土基模量对板内温度应力的影响

参照《民用机场水泥混凝土道面设计规范》,水泥道面板结构中的土基层的弹性模量选定的范围为40~160 MPa,故选取4种规格的土基模量参数(40、80、120、160),道面板表面施加温度自0 °C均匀增加至20 °C,其他参数相同,通过仿真计算,探究板内最大温度应力与土基模量的关系,计算结果如图7所示。

依据图7可知,随着土基模量的增大,板内产生的最大温度应力呈下降趋势。土基模量由40 MPa增长至80 MPa时,板内最大温度应力下降



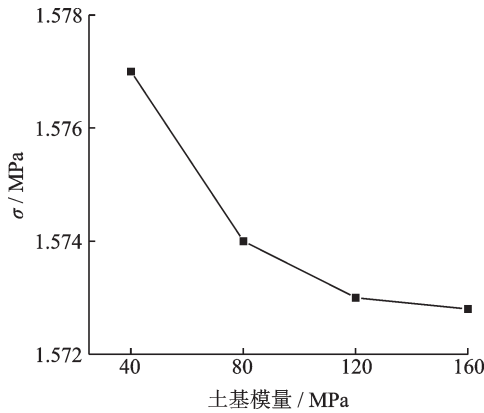


图 7 温度应力随土基模量变化规律

Fig.7 Variation of temperature stress with soil foundation modulus

速度最快,板内应力减小了 0.19%;当土基模量为 120 MPa 左右时,板内最大温度应力下降速度缓慢。根据两者关系曲线可得,土基模量对板内温度应力有影响但不影响效果并不显著,因而土基模量可在合理范围值内结合实际需求进行选择。

### 2.2 道面板厚度对板内温度应力的影响

水泥道面板结构中的道面板厚度选定的范围为 28~40 cm,故选取道面板 4 种厚度规格(28、32、36、40),结合日常温度变化的实际情况在道面板表面施加温度自 0 °C 均匀增加至 20 °C 进行仿真计算,从而得到板内最大温度应力与道面板厚度的关系如图 8 所示。

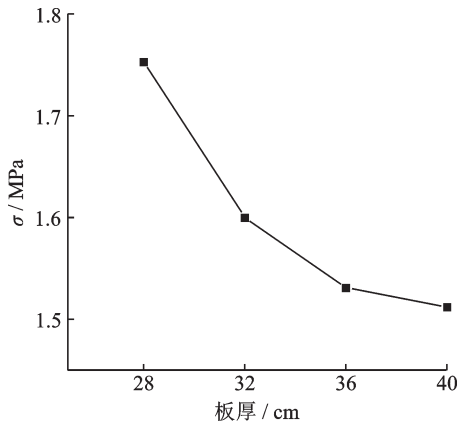


图 8 温度应力及位移随道面板厚度变化规律

Fig.8 Variation of temperature stress and displacement with pavement slab thickness

由图 8 可知,板内最大温度应力随道面板厚度的增大而减小,并且板内最大温度应力的减小速率也在不断降低。板厚自 28 cm 每增厚 4 cm,板内最大温度应力分别减小了 8.7%、4.3% 和 0.13%。原因为道面板的厚度增加,其抵抗变形的能力提高,从而使得道面板发生的翘曲变形的程度降低,道面板在重力和基底反力以及约束的共同作用下的温度应力变小,翘曲变形变小。因此,当板厚变大时,板内的最

大温度应力随之变小。综上,板厚对板内温度具有较为明显的影响作用,因而在设计过程中,可适当增大板厚以降低温度应力对道面板的影响。

### 2.3 板顶温差对板内温度应力的影响

根据民航局管理局区域的划分,分别从华北地区、东北地区、华东地区 3 个区域中选取北京、黑龙江和上海 3 个代表性区域 2021 年月均最高、最低温度,分析温度变化情况对温度应力的影响,月平均温度变化数据分析见表 6,其中正温差表示当月平均最低温度上升至当月平均最高温度差值的绝对值,负温差为当月平均最高气温降低至次月平均最低气温差值的绝对值。

根据北京、上海、黑龙江 3 个代表性区域的温度数据可知,各地区正温差相对稳定,负温差波动较大,且各地区正、负温差的平均值均相等。依据上述温差区间进行取值,分析温差对板内温度应力的影响,此时假设道面板顶部温度同大气中温度相同,且同步变温。板内温度应力与板顶正温差的关系如图 9 所示,与板顶负温差的关系如图 10 所示。

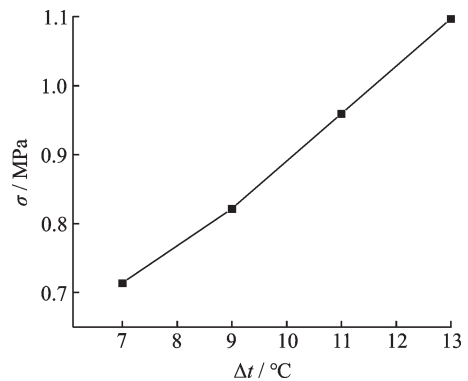


图 9 温度应力-板顶正温差变化规律

Fig.9 Change law of temperature stress-positive temperature difference at plate top

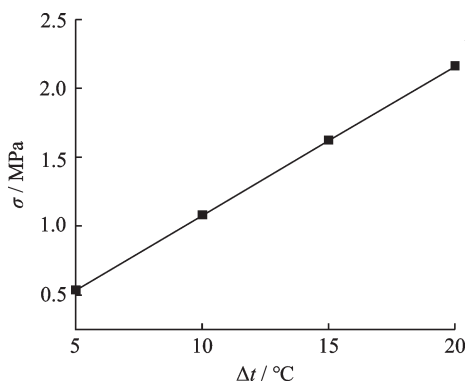


图 10 温度应力-板顶负温差变化规律

Fig.10 Change law of temperature stress-negative temperature difference between plate top

根据图 9、10 可知,板内温度应力随板顶温差的增大而增大,且几乎呈线性关系,故对两条曲线分别进行相关性分析,可得:

正温差时

$$\sigma = 0.0644\Delta t + 0.2544 \quad 0 < \Delta t < 15 \quad (9)$$

负温差时

$$\sigma = 0.1084\Delta t - 0.0088 \quad 0 < \Delta t < 25 \quad (10)$$

上述两个关系式的  $R^2$  值分别为 0.995 2 和 0.999, 符合相关性分析要求。当正、负温差均为  $10^\circ\text{C}$  时, 可知  $\sigma_{\text{正}} < \sigma_{\text{负}}$ , 故当正负温差相等时, 板内温度应力不同, 道面板产生的最大位移也不同。即正温差对板内温度应力的影响要小于负温差。

为进一步验证关系式的准确性, 选取城市海口的温度进行温度应力分析, 海口月均正负温差数据如表 6 所示。通过对正负温差产生的温度应力的仿真计算数值和关系式计算数值进行对比分析可得(表 7), 正负温差两种情况下的相对误差值分别为 1.99% 和 0.56%, 相对误差较小, 验证了关系式的准确性。

表 6 代表性区域温差数据分析表

Table 6 Data analysis of typical regional temperature difference  $^\circ\text{C}$

地区	北京		黑龙江		上海		海口		
	正温 差	负温 差	正温 差	负温 差	正温 差	负温 差	正温 差	负温 差	
月份	1	9	7	11	6	7	3	5	2
	2	10	3	12	1	8	5	8	3
	3	12	5	12	1	6	2	6	4
	4	13	7	13	4	7	2	6	3
	5	13	8	11	5	8	4	8	8
	6	11	8	11	8	6	3	8	8
	7	9	10	9	10	7	7	7	8
	8	9	15	8	16	6	9	8	8
	9	10	18	11	21	8	13	6	8
	10	10	18	11	21	6	14	4	8
	11	9	15	9	21	8	14	6	8
	12	9	10	10	14	8	9	4	8
平均值	10	10	11	11	7	7	6	6	

表 7 仿真值与计算值误差分析表

Table 7 Error analysis of simulation value and calculation value

参数	仿真计算值/ MPa	关系式计算 值/MPa	相对误差值/%
正温差	0.659 3	0.640 8	1.99
负温差	0.637 8	0.641 4	0.56

### 3 温度-荷载耦合场下道面剩余寿命

#### 3.1 道面板内耦合应力分析

在建立的道面模型中模拟道面板受不同温度梯度作用, 分别计算仅受温度荷载作用、仅受到飞机荷载作用和温度-飞机荷载耦合作用 3 种加载方式产生的板内应力。在不同温度梯度下, 将 B737-800 飞机

荷载 790.04 kN 作用在道面板横边临界荷位时产生的翘曲应力和荷载应力进行叠加与温度-飞机荷载耦合作用产生的应力进行比较, 如表 8 所示, 在温度梯度和飞机荷载共同作用下产生的耦合应力要小于温度翘曲应力和荷载应力的叠加之和, 经计算, 耦合应力和叠加应力相差的均值为 4.93%。通过仿真结果可知, 翘曲应力最大值产生于板角位置处, 耦合应力最大值产生于板边位置处, 因而考虑温度应力和飞机荷载应力的直接相加结果要更加安全。

表 8 不同温度梯度道面板内应力值

Table 8 Internal stress values of different temperature gradient channel panels

温度梯度/ $(^\circ\text{C}\cdot\text{m}^{-1})$	20	30	40
翘曲应力/MPa	0.147	0.258	0.376
荷载应力/MPa	2.705	2.705	2.705
荷载应力+翘曲应力/MPa	2.852	2.963	3.081
耦合应力/MPa	2.735	2.805	2.916
耦合应力/叠加应力/%	95.90	94.67	94.64

#### 3.2 累积损伤量

由于不同机型对道面的损伤情况不同, 拟采用基于 Miner 损伤原理的累积损伤法, 对跑道在不同机型作用下产生的损伤进行计算<sup>[14]</sup>。将各机型产生的疲劳消耗叠加, 即为累积损伤因子 CDF<sup>[17]</sup>, 即

$$\text{CDF} = \sum_{i=1}^k \frac{N_i(x)}{N_{ri}(x)} \quad (11)$$

式中:  $N_i$  为第  $i$  种机型重复作用次数;  $N_{ri}$  为第  $i$  种机型最大允许作用次数;  $N_i/N_{ri}$  为  $i$  种机型对道面板的疲劳消耗。

根据所得累积损伤因子值可判断道面所处疲劳状态

$$\text{CDF} \begin{cases} < 1 & \text{低于疲劳破坏极限状态} \\ = 1 & \text{疲劳破坏极限临界状态} \\ > 1 & \text{超过疲劳破坏极限状态} \end{cases}$$

#### 3.3 覆盖作用次数

飞机在道面上的作用位置服从正态分布, 现阶段主要通过飞机轮迹横向分布来计算飞机轮迹作用次数<sup>[18]</sup>。依据飞机起落架的构型不同, 轮迹覆盖的作用效果不同, 计算公式也不同, 轮迹覆盖作用曲线见式(12~16)。

(1) 单轴单轮

$$F_1(x) = \begin{cases} f_{\text{左}}(x) = \frac{1}{\sigma_0\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x+T_w/2}{\sigma_0}\right)^2} & x < 0 \\ f_{\text{右}}(x) = \frac{1}{\sigma_0\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-T_w/2}{\sigma_0}\right)^2} & x \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

两轮迹重合时

$$F_2(x) = f_{左}(x) + f_{右}(x) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \left[ e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x+T_w/2}{\sigma_0} \right)^2} + e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x-T_w/2}{\sigma_0} \right)^2} \right] \quad (13)$$

式中:  $x$  为点距跑道中线的垂直距离, 中线左侧为负右侧为正;  $T_w$  为主起落架间距。

(2) 单轴双轮

$$f_{21}(x) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left[ \frac{x+(T_w+S_i)/2}{\sigma_0} \right]^2} \quad (14)$$

$$f_{22}(x) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left[ \frac{x+(T_w+S_i)/2}{\sigma_0} \right]^2} \quad (15)$$

$$F_3(x) = f_{21}(x) + f_{22}(x) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \left[ e^{-\frac{1}{2} \left[ \frac{x+(T_w+S_i)/2}{\sigma_0} \right]^2} + e^{-\frac{1}{2} \left[ \frac{x+(T_w-S_i)/2}{\sigma_0} \right]^2} \right] \quad (16)$$

式中  $S$  为主起落架轮距。

道面覆盖作用次数计算公式为<sup>[17]</sup>

$$\sigma(x) = \begin{cases} \sigma_z - \frac{(\sigma_z - \sigma_H)x}{0.15B} & 0 \leq x \leq 0.15B \\ \sigma_H & 0.15B \leq x \leq 0.85B \\ \sigma_H + \frac{(\sigma_z - \sigma_H)(x - 0.85B)}{0.15B} & 0.85B \leq x \leq B \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $\sigma_H$  为道面板横边最大拉应力;  $\sigma_z$  为道面板纵边最大拉应力。

综上, 可得第  $i$  种飞机作用于道面板横向位置  $x$  处的疲劳寿命计算公式为

$$N_i(x) = \begin{cases} 10^{-1.7136e + 4.284} & e > 1.25 \\ 10^{2.8127e - 1.2214} & e \leq 1.25 \end{cases} \quad (21)$$

此时, 应力比的值可简化为

$$e = \frac{\sigma(x)}{f} \quad (22)$$

在疲劳方程的计算中, 仅考虑了道面荷载应力的影响, 而温度这一因素对板内应力的影响是不可忽略的。鉴于温度应力和荷载应力的叠加效果大于温度-飞机荷载的耦合应力, 出于安全考虑, 单独计算飞机荷载应力和温度应力。已知仅考虑飞机荷载的道面板荷载应力为  $\sigma_0$ , 温度作用下道面板温度荷载应力为  $\sigma_t$ , 可得

$$\sigma_1 = \sigma_0 + \sigma_t \quad (23)$$

根据式(22)得

$$e_1 = \frac{\sigma_1}{f} \quad (24)$$

根据式(21)得到在温度应力和飞机荷载应力影响下的道面允许作用次数为

$$N_{i1}(x) = \begin{cases} 10^{-1.7136e_1 + 4.284} & e_1 > 1.25 \\ 10^{2.8127e_1 - 1.2214} & e_1 \leq 1.25 \end{cases} \quad (25)$$

$$N_i(x) = n_i F_i(x) W_i \quad (17)$$

式中:  $n_i$  为第  $i$  种机型运行次数;  $F_i(x)$  为第  $i$  种机型的轮迹覆盖作用曲线;  $W_i$  为第  $i$  种飞机的轮印宽度。

3.4 道面允许作用次数确定

本文荷载应力通过仿真模拟计算取得, 与 NCHRP1-26 疲劳方程的计算方法相吻合, 故选取 NCHRP1-26 疲劳方程。具体公式为

$$N = \begin{cases} 10^{-1.7136e + 4.284} & e > 1.25 \\ 10^{2.8127e - 1.2214} & e \leq 1.25 \end{cases} \quad (18)$$

$$e = \frac{\sigma}{f} \quad (19)$$

式中:  $N$  为 50% 道面板开裂时飞机作用次数;  $e$  为应力比;  $\sigma$  为仿真模拟计算取得的板边最大应力;  $f$  为道面设计弯拉强度。

有研究针对多种道面结构不同机型的临界荷载应力进行了计算分析, 得到了以道面板宽度  $B$  为周期的荷载应力分段函数<sup>[18]</sup>, 单块板横线位置  $x$  处的荷载应力为

根据式(21~25), 温度荷载应力的影响系数  $K_T$  为

$$K_T = \begin{cases} 10^{1.7136 \frac{\sigma_t}{f}} & e_0, e_1 > 1.25 \\ 10^{2.8127 f^{1.2214} \sigma_0^{-1.2214} (\sigma_0 + \sigma_t)^{-1.2214}} & e_0, e_1 \leq 1.25 \end{cases} \quad (26)$$

由式(25)可知, 无论  $e_0, e_1 > 1.25$  还是  $e_0, e_1 \leq 1.25$ , 随着温度荷载应力的越大, 影响系数越大, 对道面板疲劳寿命的影响也越大。

4 实例应用

为研究温度、飞机荷载因素对道面寿命的影响, 选取中南地区飞行区等级 4F 级某机场, 计算道面疲劳寿命。已知该机场道面板尺寸为  $4.5 \text{ m} \times 5.0 \text{ m} \times 0.38 \text{ m}$ , 道面板设计弯拉强度为  $5.5 \text{ MPa}$ , A320 和 B737-800 是该机场跑道的主要作用机型, 2017 年至 2021 年累计起降架次分别为 392 25 架次和 839 40 架次, 则轮迹横向分布函数分别为

$$F_{A320}(x) = \frac{2}{0.48 \times \sqrt{2\pi}} \left\{ e^{-\frac{[(x+3.41)/0.48]^2}{2}} + e^{-\frac{[(x+4.19)/0.48]^2}{2}} \right\} \quad (27)$$

$$F_{B737-800}(x) = \frac{1}{0.5 \times \sqrt{2\pi}} \left\{ e^{-\frac{[(x+2.43)/0.5]^2}{2}} + \dots \right\}$$

$$e^{\frac{[(x+3.29)/0.5]^2}{2}} \quad (28)$$

通过查询本地天气,可知年均正负温差均为 $9^{\circ}\text{C}$ ,故根据式(9,10)计算温度应力。据式(9)计算可得, $\sigma=0.0644\Delta t+0.2544=0.834$ ;据式(10)计算可得, $\sigma=0.1084\Delta t-0.0088=0.967$ 。

假设该机场年均起降架次相同,且月均航班数量相同,每月正负温差起降架次相同,即在正、负温差时A320和B737-800起降架次分别为3922架次和8394架次。通过仿真模型计算道面板在荷载作用下产生的温度应力和板边最大拉应力,根据式(17~25)计算最大容许作用次数和2017—2021年的疲劳消耗,如表9所示。

表9 道面疲劳损伤计算表

Table 9 Calculation of pavement fatigue damage

参数	正温差		负温差	
	A320	B737-800	A320	B737-800
板边应力 $\sigma$	1.937	2.405	1.937	2.405
$\sigma_{\text{修}}$	2.771	3.239	2.904	3.372
重复作用次数	12 585	27 202	10 946	27 200
最大允许作用次数	3 146 278	234 504	1 368 307	129 594
疲劳消耗	0.004	0.116	0.008	0.210
道面剩余疲劳强度	0.662			

假定该机场未来年运行架次平均增长率为5%,对机场道面未来年运行次数对道面的疲劳损伤进行计算,如表10所示。

表10 未来年运行次数对道面的疲劳损伤计算表

Table 10 Calculation of fatigue damage of pavement caused by future annual operation times

参数	正温差		负温差	
	A320	B737-800	A320	B737-800
平均运行架次	4 118	8 813	4 118	8 813
年均重复作用次数	4 969	13 360	4 969	13 360
最大允许作用次数	3 146 278	234 504	1 368 307	129 590
疲劳消耗	0.002	0.057	0.004	0.1
疲劳消耗和	0.163			

根据疲劳消耗和剩余疲劳强度预测道面剩余使用寿命为4.1年,小于该机场设计剩余使用寿命6年,验证了建立的耦合场下道面剩余寿命评价模型的可靠性与可行性。温度翘曲应力对道面板的损伤在一定程度上影响着道面板的使用寿命,飞机轮载和自然环境温度都是重要因素。

## 5 结 论

针对目前在道面设计中尚未考虑温度应力对道面板疲劳消耗的影响,本文通过仿真、试验、理论相结合的方法,确定温度梯度,对温度应力进行敏

感性分析,构建环境温度与荷载耦合场下的机场水泥混凝土道面剩余寿命评价模型。主要研究结论如下:

(1)在实验室浇筑38 cm厚缩放尺寸道面板,测量了基于道面板深度的温度分布情况,对温度与深度进行了相关性分析,得到了不同厚度道面板的最大温度梯度推荐值。

(2)对温度应力进行了敏感性分析,发现板厚和温差对温度应力影响较为显著,建立了温度应力与温差的相关性关系模型见式(9,10),提出在道面板设计过程中,可适当增大板厚降低温度应力对道面板的影响。

(3)分析了温度梯度、飞机荷载和温度-飞机荷载耦合作用3种情况下道面板产生的板内应力,发现温度翘曲应力和飞机荷载的叠加应力大于温度-飞机荷载的耦合应力,两者相差4.93%,提出了在道面设计中单独考虑温度应力的影响更为安全、方便。

(4)基于荷载和温度耦合作用下的应力损伤累积原理,计算道面剩余容许作用次数,构建耦合场下道面剩余寿命评价模型,提出温度应力修正系数 $K_T$ ,从而可以更为准确地预测机场跑道道面板剩余使用寿命。

(5)选取中南地区飞行区等级4F级某机场,进行了耦合场下道面剩余寿命评价模型的实例应用,计算得出在环境温度与荷载耦合场的作用下道面剩余寿命为4.1年,小于该机场设计剩余使用寿命6年,验证了温度-荷载耦合场下道面剩余寿命模型的可行性。

## 参考文献:

- [1] 郭超,张敏江,陆征然,等.斜向交叉预应力混凝土路面温度应力分析[J].公路交通科技,2016,33(8):25-30,85.  
GUO Chao, ZHANG Minjiang, LU Zhengran, et al. Study on temperature stress of cross-tensioned PC pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016,33(8): 25-30,85.
- [2] ABRAHAM S M, RANSINCHUNG G D R N. Temperature variation and stresses in unreinforced concrete pavement containing RAP[J]. Construction and Building Materials, 2020. DOI: 10.1016/j. conbuildmat.2020.120506.
- [3] NISHIZAWA T, KOYANAGAWA M, TAKEUCHI Y, et al. Toru Yoshimoto thermal stress calculation method for concrete pavement based on temperature prediction and finite element method analysis[J]. Transportation Research Record, 2017, 2640: 104-114.



- [4] 刘建伟,虞文景,下村,等. 机场水泥混凝土板的温度应力特性研究[J]. 中外公路, 2014, 34(4): 77-80.  
LIU Jianwei, YU Wenjing, XIA Cun, et al. Study on thermal stress characteristics of airport cement concrete slab[J]. Chinese and Foreign Highways, 2014, 34(4): 77-80.
- [5] 付建峰,陈凤晨,苏新. 基于实测温度的机场道面温度应力影响因素敏感性分析[J]. 中外公路, 2017, 37(4): 38-41.  
FU Jianfeng, CHEN Fengchen, SU Xin. Sensitivity analysis of influencing factors of airport pavement temperature stress based on measured temperature [J]. Chinese and Foreign Highways, 2017, 37(4): 38-41.
- [6] 杨新燕. 基于有限元的温度-荷载-行车速度耦合作用下路面结构孔隙水压力对比研究[J]. 公路交通科技, 2021, 38(5): 23-30.  
YANG Xinyan. Comparative study on dynamic pore water pressure of pavement structure under coupling of temperature, load and driving speed based on fe method[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(5): 23-30.
- [7] 陈卫东,董凤珍. 荷载-温度耦合作用下土工布防治反射裂缝效果试验研究[J]. 公路, 2022(10): 82-88.  
CHEN Weidong, DONG Fengzhen. Research on the effects of geotextile on preventing and controlling reflection cracks under load-temperature coupling[J]. Highway, 2022(10): 82-88.
- [8] 张润峰,戚春香,张献民,等. 道面宽度对机场跑道多年冻土地基温度场的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(4): 568-576.  
ZHANG Runfeng, QI Chunxiang, ZHANG Xianmin, et al. Influence of pavement width on temperature field of permafrost subgrade in airfield runway[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(4): 568-576.
- [9] 陈斌,程国勇,杨召焕. 温度翘曲应力对机场刚性道面寿命的影响[J]. 中国民航大学学报, 2011, 29(6): 12-15.  
CHEN Bin, CHENG Guoyong, YANG Zhaohuan. Influence of thermal warping fatigue on airport rigid pavement life[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2011, 29(6): 12-15.
- [10] 廖公云,黄晓明. ABAQUS有限元软件在道路工程中的应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 2008.  
LIAO Gongyun, HUANG Xiaoming. Application of ABAQUS finite element software in road engineering [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2008.
- [11] 周正峰,凌建明,袁捷,等. 机场刚性道面接缝传荷能力的评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(6): 844-849.  
ZHOU Zhengfeng, LING Jianming, YUAN Jie, et al. Evaluation of load transfer efficiency at joints for rigid airport pavement[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(6): 844-849.
- [12] 中国民用航空局. 民用机场道面评价管理技术规范: MH/T 5024—2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.  
CACC. Technical specifications for evaluation and management of civil airport pavement: MH/T 5024—2019 [S]. Beijing: China Communications Press, 2019.
- [13] 严明星,王金昌. ABAQUS有限元软件在路面结构分析中的应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2016.  
YAN Mingxing, WANG Jinchang. Application of ABAQUS finite element software in pavement structure analysis[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2016.
- [14] 张献民,李梦晓,陈宇,等. 机场跑道水泥混凝土道面板尺寸研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 48(4): 551-559.  
ZHANG Xianmin, LI Mengxiao, CHEN Yu, et al. Size of cement concrete pavement slab of airport runway [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 48(4): 551-559.
- [15] 翁兴中. 机场道面设计[M]. 3版. 北京: 人民交通出版社, 2017: 34-39.  
WENG Xingzhong. Design of airport pavement [M]. 3rd ed. Beijing: China Communications Press, 2017: 34-39.
- [16] 姚祖康. 水泥混凝土路面设计理论和方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.  
YAO Zukang. Theory and method of cement concrete pavement design[M]. Beijing: People's Communications Press, 2003.
- [17] 李巧生,赵鸿铎,凌建明. 适应大型特种飞机的机场水泥混凝土道面结构设计方法[J]. 土木工程学报, 2011, 44(1): 121-126.  
LI Qiaosheng, ZHAO Hongduo, LING Jianming. Method of airport concrete pavement design for large military transport aircraft [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(1): 121-126.
- [18] 程国勇,张扬扬,周浩. 机场跑道轮迹测试及横向分布参数研究[J]. 公路交通科技, 2020, 37(11): 22-30.  
CHENG Guoyong, ZHANG Yangyang, ZHOU Hao. Study on wheel track test and lateral distribution parameters of airport runway[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(11): 22-30.