

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0729

温度应力对机场道面板疲劳损伤的影响

张献民^{1,*}, 聂鹏飞¹, 高志斌², 包伊婷¹, 李长辉¹

(1. 中国民航大学交通科学与工程学院, 天津 300300; 2. 天津滨海国际机场有限公司, 天津 300300)

摘要: 目前, 中国机场水泥混凝土道面设计中并未单独计算温度应力。参考传热学研究成果在道路工程和场道工程中的应用, 采用华北地区某机场实例及其气象数据, 建立有限元模型模拟道面结构温度场, 并计算分析该机场道面板温度场和温度应力情况。结果表明, 温度荷载造成的板底应力曲线与气温、辐射曲线之间存在较大的相位差, 板底最大拉应力出现在 19—20 时。将随时间变化的温度应力与随横向位置变化的飞机轮载应力叠加, 并将轮载作用次数按横向、月度、时刻分布, 计算机场道面板的累计损伤和剩余寿命。结果表明, 采用该方法预测的机场跑道剩余寿命与钻芯取样检测、FAARFIELD 软件预测结果, 以及跑道实际继续运营时长较为接近。可通过所提方法计算厚度较大的机场道面板的温度应力, 对既有有机场水泥混凝土道面结构的剩余寿命进行预测评估, 并为大尺寸机场水泥混凝土道面板的研究和设计提供参考。

关键词: 机场工程; 水泥混凝土道面板; 温度应力; 轮载作用; 累计损伤; 疲劳寿命

中图分类号: V351.11

文献标志码: A **文章编号:** 1001-5965(2023)10-2558-09

机场道面结构温度场发生变化时, 水泥混凝土道面板将出现翘曲变形, 并产生温度应力。温度场和温度应力的影响因素众多, 且道面结构存在一定的特性, 如板厚较大等, 很多学者致力于机场道面板温度场变化和温度应力确定方法的研究。

目前, 常用方法主要有理论分析法和统计分析法。理论分析法根据气象学和传热学的基本原理, 以数值分析推导出层状体系下路面温度场的解析解。早在 20 世纪, Barber^[1]、严作人^[2]、吴赣昌^[3] 便建立了路面温度场的预测模型, 但由于当时的计算手段有限, 对太阳辐射和灰体辐射等因素进行了忽略或近似处理, 建立的模型较为失真。统计分析法则是在理论分析的前提下, 忽略温度场的变化, 并将非线性的温度曲线等效为线性温度梯度, 如中国行业标准 JTG D40—2011^[4] 中直接给出各区划的温度梯度值。然而, 该方法取得的各回归系数取值

均以 22 cm 为标准板厚^[5], 主要考虑公路用水泥混凝土板, 若应用于厚度较大的机场道面板, 则往往会得到过大的应力结果。故而在机场领域, 需要采用新的方法计算温度应力。李巧生等^[6] 认为温度应力的影响被其他因素抵消; Cai^[7]、吴爱红^[8] 等以温度应力作为循环应力中的低应力; 翁兴中等^[9] 则借鉴公路领域规范, 以温度梯度作为计算指标来考虑温度应力, 并对其修正; 田波^[10]、赵鸿铎^[11] 等则通过实测温度和应变计算温度应力。

温度应力会对机场道面板的疲劳损伤造成影响, 其作用不宜忽视。自 Foxworthy^[12] 提出以疲劳方程计算容许作用次数作为机场刚性道面寿命的无损检测和预测方法后, Thompson 和 Barenberg^[13] 首次将温度应力引入总应力计算中, Khazanovich 和 Darter 等^[14-15] 也将温度应力作为设计应力的一部分, 并提出按不同月份的气象条件计算白天和夜

收稿日期: 2021-12-03; 录用日期: 2022-04-19; 网络出版时间: 2022-06-09 08:48

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20220607.1647.001.html

基金项目: 中国工程院咨询研究项目(2019C1-0002); 天津市教委自然科学基金计划(2018KJ245); 天津市技术创新引导专项基金企业科技特派员项目(21YDTPJC00470)

*通信作者. E-mail: cauczxm@126.com

引用格式: 张献民, 聂鹏飞, 高志斌, 等. 温度应力对机场道面板疲劳损伤的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(10): 2558-2566.
ZHANG X M, NIE P F, GAO Z B, et al. Influence of temperature stress on fatigue damage of airfield pavement slab[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(10): 2558-2566 (in Chinese).

晚的温度应力。

由于现有统计分析结果主要为公路领域研究成果, 不宜直接适用于厚度相对较大的机场道面, 且现有理论分析法在近似处理上较为简单, 本文在理论分析法的基础上建立有限元模型, 利用计算机迭代较好地解决了上述近似问题, 得到了更贴合实际的场道结构的温度场和温度应力。在前人研究成果的基础上, 建立了一种同时考虑温度应力和轮载应力及其分布的机场水泥混凝土道面板累计损伤计算方法。

1 温度作用

1.1 温度场理论与模拟

利用 ABAQUS 及编写的相关子程序, 建立道面结构的三维有限元模型, 参考 MEPDG 程序设计思路^[13-14]及有限元模拟路面结构和道面结构温度场研究成果^[16-18], 在热学计算部分考虑太阳辐射^[1]、大气与道面对流换热^[2]、灰体辐射^[19]、层间热阻^[20]等因素, 输入气温、风速、辐照量、辐照时长等气象参数的月平均值, 模拟水泥混凝土道面结构的温度场变化情况, 如图 1 所示。

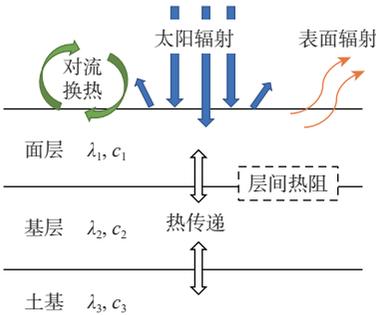


图 1 道面结构温度场示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pavement temperature field

1.1.1 气温模型

采用 T_k 修正的正弦-指数模型^[21]模拟气温日变化, 该模型在本节算例附近区域的模型效率为 97%, 能较好地模拟晴天、阴天和多云天气^[22], 其气温日变化曲线分为日出至日落的白天段和日落至第二天日出的夜间段, 分别如下:

1) 白天 ($12 - n_{dl}/2 < t < 12 + n_{dl}/2$)。

$$T_a = T_{\min} - \frac{T_k}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{T_k^2 + 4T_kAS(t)} \quad (1)$$

$$A = (T_{\max} - T_{\min}) \left(1 + \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_k} \right) \quad (2)$$

$$S(t) = \sin \left(\frac{t - 12 + n_{dl}/2}{n_{dl} + 2P} \pi \right) \quad (3)$$

式中: t 为太阳时, 本节中所有时间变量均为太阳时; T_a 为气温; T_{\max} 为最高气温; T_{\min} 为最低气温;

T_k 为考虑气体受热上升并加速热量向上层大气输送后的温度修正值, 取 15°C ; A 为基于 T_k 修正的气温振幅; P 为最高气温出现时间与正午的差值, 取 2h ; $S(t)$ 为未修正的正弦气温公式; n_{dl} 为日长, 可表示为

$$n_{dl} = 12 \left(1 + \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{a}{b} \right) \right) \quad (4)$$

$$a = \sin \varphi_{\text{lat}} \sin \varphi \quad (5)$$

$$b = \cos \varphi_{\text{lat}} \cos \varphi \quad (6)$$

$$\sin \varphi = -\sin \left(\frac{\varphi_{\max} \pi}{180} \right) \cos \left(\frac{2\pi (n_{\text{date}} + 10)}{365} \right) \quad (7)$$

其中: φ_{lat} 为地理纬度; φ 为太阳赤纬; φ_{\max} 为太阳赤纬最大值, 为 23.45° ; n_{date} 为一年中的日序。

2) 夜间 ($12 + n_{dl}/2 < t < 12 - n_{dl}/2 + 24$)。

$$T_a = \frac{T_{\min} - T_{\text{sset}} e^{-\frac{\eta}{\tau}} + (T_{\text{sset}} - T_{\min}) e^{-\frac{t-t_{\text{sset}}}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{\eta}{\tau}}} \quad (8)$$

式中: T_{sset} 为日落时刻的气温; t_{sset} 为日落时刻, 即 $t_{\text{sset}} = 12 + n_{dl}/2$; τ 为时间系数, 取 4h ; η 为夜长, 即 $\eta = 24 - n_{dl}$ 。

1.1.2 对流换热

道面与大气对流换热的热流量损失为

$$Q_c = h_c(T_s - T_a) \quad (9)$$

式中: T_s 为道面表面温度; h_c 为道面表面与空气的对流换热系数, 按式 (10)^[23] 计算:

$$h_c = 3.7v_w + 9.4 \quad (10)$$

其中: v_w 为风速。

1.1.3 太阳辐射

采用余弦公式^[1]模拟太阳辐射日变化, 该公式认为太阳辐照以 12 时为极大值点余弦分布, 如下:

$$Q_{\text{sr}} = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < 12 - c/2 \\ Q_0 \cos(m\omega(t - 12)) & 12 - c/2 \leq x < 12 + c/2 \\ 0 & 12 + c/2 \leq x \leq 24 \end{cases} \quad (11)$$

式中: Q_{sr} 为太阳辐射量; Q_0 为正午最大太阳辐射量, $Q_0 = 0.131 Q_d$, Q_d 为日总太阳辐射量; ω 为角频率, $\omega = \pi/12$; $m = 12/c$, c 为太阳辐照时长。

道面结构不能完全吸收太阳辐射热, 存在太阳辐射吸收率 a_s , 即 $a_s Q_{\text{sr}}$ 为输入道面结构的太阳辐射能。

1.1.4 有效灰体辐射

道面表面的有效灰体辐射(道面长波辐射与大气长波辐射的差值)为

$$Q_{\text{elr}} = C_0 (\epsilon_p T_s^4 - a_a \epsilon_a T_{\text{sky}}^4) \quad (12)$$

式中: Q_{elr} 为道面表面有效辐射量; C_0 为 Stefan-

Boltzmann 常数; ε_p 为道面表面发射率; ε_a 为天空辐射发射率; a_a 为道面长波吸收率; T_{sky} 为天空有效温度; 在灰体辐射中, T_s 与 T_{sky} 均以华氏温度计计量。

根据相关学者的研究^[24-25], 中国的天空有效温度与气温的差值从南到北递增, 夏季约为 $-16 \sim -12$ K, 冬季约为 $-27 \sim -15$ K。具体地区的天空有效温度与气温差值可由当地气象资料计算得到, 或查询《中国建筑热环境分析专用气象数据集》^[26] 等资料得到。

其他如热传导方程、层间热阻等则按经典理论进行设置。

1.1.5 应力计算

在力学计算部分, 添加重力并设置基层与面层之间的约束和摩擦, 即可模拟水泥混凝土道面板的温度应力情况。根据弹性力学基本原理, 道面板的应力按式(13)计算:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y) - \frac{E\alpha T_z}{1-\mu} \\ \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x) - \frac{E\alpha T_z}{1-\mu} \end{cases} \quad (13)$$

式中: σ_x 、 σ_y 分别为横向、纵向应力; ε_x 、 ε_y 分别为横向、纵向应变; E 为弹性模量; μ 为泊松比; α 为热膨胀系数; T_z 为板内深度 z 处的温度值。

1.2 有限元建模要点及模型标定

为提高计算速度, 有限元模型采用顺序耦合法计算应力。单元类型分别选择二十节点二次传热六面体 DC3D20 单元和二十节点二次六面体减缩积分 C3D20R 单元。在深度方向, 面层划分 10 个节点^[14], 基层划分 3 个节点; 在平面方向, 单元的间距约为面层厚度的一半^[27]; 土基的网格密度对结果影响很小, 可适当降低土基的网格密度。经过大量试算, 该网格划分既保证了计算速度和精度, 也便于提取数据。建立 9 块道面板的全宽模型^[17], 道面板和基层层间关系采用切向的库伦摩擦方程表征, 摩擦系数取值为 1.5, 基层与土基完全黏结; 基层和土基侧面横向设置 x 方向约束, 纵向设置 y 方向约束; 土基底部设置 x 、 y 、 z 等 3 个方向的约束; 传力杆和纵缝拉杆按设计资料和现行规范布置, 横缝传荷系数为 0.95, 纵缝传荷系数为 0.75^[28]。有限元模型如图 2 所示。

对于求取路面与道面结构温度应力的模型, 可采用道面板在温度梯度作用下的翘曲变形进行准确度验证。根据弹性力学基本原理, 推导出道面板不受重力与其他约束时的翘曲变形计算公式为

$$\delta = \frac{\alpha L^2 \Delta F}{2h} \quad (14)$$

式中: δ 为板内任意点的竖向变形值; ΔF 为板厚度方向的线性温度差; L 为板内任意点到板中心的距离; h 为板厚。



图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

由于有限元解与上述解析解相比, 考虑了自重和与自重有关的约束力, 当有限元中设置的道面板的自重逐渐降低时, 有限元解将逼近该解析解。因此, 可以用式(14)进行有限元模型的准确性检验。建立平面尺寸为 $4.5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 、厚度为 0.38 m 的混凝土道面板, 施加 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 的线性温度差。将其重度从 W 降低至 $0.001 W$, 分别求取道面板长边中点和短边中点的翘曲变形值, 与解析解对比结果如表 1 所示。随着板重度逐渐趋近于零, 道面板两边中点翘曲变形值的有限元解趋近于解析解, 由此可以验证模型的准确性。

表 1 道面板边中点翘曲变形值有限元解与解析解的对比

Table 1 Comparison between FEM solutions and analytical solution of warping deformation at midpoint of edge of pavement slab

有限元/解析解	板重度	翘曲变形值/mm	
		长边中点	短边中点
有限元解	W	1.306	1.651
	$0.1W$	1.903	2.425
	$0.01W$	1.983	2.456
	$0.001W$	1.996	2.466
解析解		1.998	2.467

1.3 算例分析

华北地区某机场飞行区等级为 4F, 道面板平面尺寸为 $4.5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$, 厚度为 38 cm , 其他参数如表 2 所示, 气象参数的月平均值如表 3 所示。需要说明的是, 本节算例采用的气象参数是机场气象站数据的月平均值, 以月平均气象数据求得的温度应力为该月代表性气象条件下的温度应力, 后续则以该温度应力作为该月的温度应力设计值参与该月疲劳损伤计算。这也是部分学者^[14-15] 将温度应力集成入道面疲劳损伤的处理方法。

由于温度荷载造成的道面板底最大拉应力出

表 2 机场跑道物理参数

Table 2 Physical parameters of airfield pavement

类型	厚度/m	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量/ MPa	泊松比	膨胀系数/ ℃ ⁻¹	导热系数/ (J·m·h·℃ ⁻¹) ⁻¹	比热容/ (J·kg·℃ ⁻¹) ⁻¹	太阳辐射 吸收率	长波辐射 吸收率	道面辐射 发射率	天空辐射 发射率
水泥混凝土面层	0.38	2 500	38 000	0.15	1×10 ⁻⁵	8 000	960	0.76	0.85	0.63	0.88
水泥稳定碎石基层	0.4	2 000	1 500	0.25	9.8×10 ⁻⁶	6 700	910				
土基	10	1 800	90	0.35	4×10 ⁻⁶	6 300	1 040				

表 3 机场跑道月平均气象参数

Table 3 Monthly mean meteorological parameters of airfield pavement

月份	最高气温/ ℃	最低气温/ ℃	风速/ (m·s ⁻¹)	日总辐射量/ (J·m ⁻²)	太阳辐射 时长/h
1月	7.78	-2.22	3.67	5.34×10 ⁶	8.2
2月	13.33	0.56	4.96	9.10×10 ⁶	9.1
3月	19.44	5.00	5.34	1.143×10 ⁷	9.4
4月	23.33	8.33	5.32	1.686×10 ⁷	10.6
5月	31.67	17.22	5.20	1.730×10 ⁷	11.3
6月	32.78	21.11	4.38	1.444×10 ⁷	11.4
7月	31.67	21.11	4.04	1.076×10 ⁷	11.4
8月	32.78	22.78	4.32	1.945×10 ⁷	11.4
9月	30.56	17.78	3.96	1.176×10 ⁷	11.3
10月	21.67	11.11	3.54	9.71×10 ⁶	10.2
11月	16.11	5.00	4.41	8.70×10 ⁶	8.9
12月	8.89	-2.78	4.39	6.32×10 ⁶	8.3

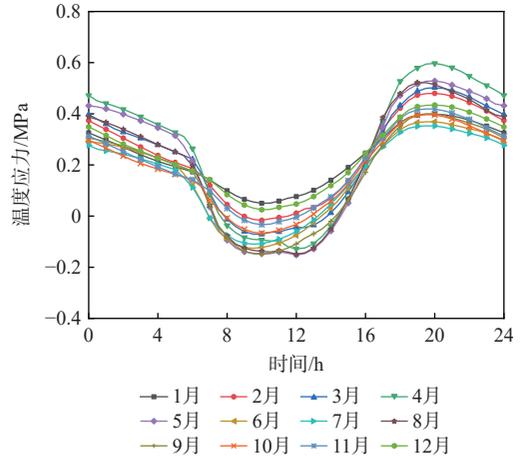


图 3 不同月份温度应力随时刻变化

Fig. 3 Temperature changes with moment in different months

现在长边中部,且轮载在长边处产生的应力也大于短边,以长边板底中部的温度应力为温度应力的设计值,得到板底中部不同月份随时刻变化的温度应力,如图 3 所示。

可以看出,不同月份的温度应力曲线虽然数值上略有不同,但变化趋势是一致的。同时,4—9月的温度应力振幅较大,而 10—12 月和 1—3 月的振幅较小,其中 1 月的温度应力变化最小。这是由于该月的太阳辐照最小且大气温差最小,道面板的热交换程度低,板内温度变化小,得到的温度应力变化就小。同样的,由于有效辐射主要与道面板自身温度有关,其他月份的温度应力也主要受太阳辐照与大气温度综合影响。

温度应力的变化曲线与气温曲线和辐射曲线之间出现较大的相位差。在 11—12 时左右,道面板底出现最大压应力,而在 19—20 时左右,出现最大拉应力。主要原因是:机场道面板厚度较大,温度应力的滞后效应明显。例如,谈至明和姚祖康^[29]给出的简化公式为

$$\sigma_{tx} = \frac{\alpha E h}{2} G_{m0} \alpha_h C_x r_x \cos(\omega t - \theta_x) \quad (15)$$

式中: σ_{tx} 为道面板底温度应力; G_{m0} 为 22 cm 标准厚度的日最大温度梯度; α_h 为板厚修正系数; C_x 为翘曲温度应力系数,与面层、基层的结构参数和层间

接触关系等因素有关; r_x 为内应力修正系数; θ_x 为规定上午 6 时 $t = 0$ 的相位角,与板厚 h 和翘曲温度应力系数 C_x 有关。

式(15)与其他任何相关公式、理论都明确指出,一日之内板底温度(拉)应力最大值的出现时间与板厚有关,且板越厚,温度应力最大值的出现时间越晚。若以公路常见的 22 cm 板厚和常见 0.7 的翘曲温度应力系数查表^[29]得 $\theta_x = 0.536$,即温度应力的最大值出现在约中午 12 时,与常规认识相符;以本节算例机场道面 38 cm 板厚和由结构参数计算得到的 0.4 翘曲温度应力系数查表^[23]得到的 $\theta_x = 1.049$,即温度应力的最大值出现在约夜间 19 时,与图 3 结果十分接近。

2 轮载作用

对于特定的跑道结构,固定机型轮载造成的应力是一定的,并以年总的作用次数计算疲劳。为适配按月份和时刻变化的温度应力,需要确定飞机轮载作用次数在不同月份、不同时刻的分布,并考虑不同的机型和轮载横向分布。一般来说,常见民用机型(空客 320 系列、波音 737 系列等)的主起落架间距大于单块机场道面板宽度,同一块板上只有一组起落架施加荷载,故认为飞机起降架次即为起落架对单块道面板的作用次数,并以此作为飞机的轮载作用次数。

2.1 轮载作用次数的月度分布

根据中国民用航空局运输生产指标统计显示,

中国机场 2017—2020 年的月度起降架次如图 4 所示。可以看出,除 2020 年受新冠疫情影响导致有一定波动外,其余年份的月度起降架次变化较小。因此,可认为每月的起降架次是一致的,即月度的轮载作用次数为年作用次数的 1/12。

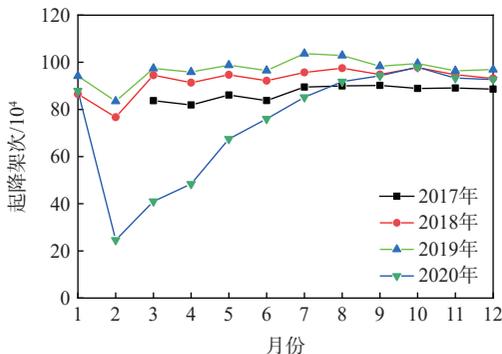


图 4 航班起降架次随月份变化

Fig. 4 Flight coverage changes with months

2.2 轮载作用次数的时刻分布

中国旅客吞吐量前十机场的航班时刻如图 5 所示。中国大型机场航班起降波形基本属于早出港高峰-晚进港高峰形航班波范畴,日间运行阶段降落、起飞高峰交替出现^[30]。这导致飞机起降主要集中在早 9 时至晚 22 时之间,且起降架次波动较小。

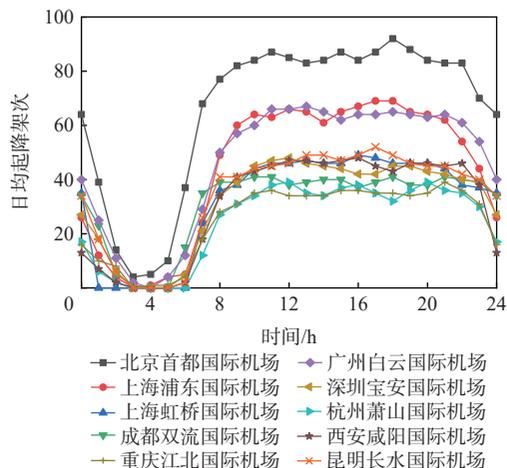


图 5 航班起降波形

Fig. 5 Flight coverage waveforms

为简化计算,将大型机场的飞机起降架次与时刻的关系其简化为

$$f(t) = \begin{cases} \frac{9}{50}g|t-4| & 0 \leq t < 9 \\ g & 9 \leq t < 23 \\ \frac{9}{10}g & t = 23 \end{cases} \quad (16)$$

式中: t 为时刻; $g = p/18.5$, p 为机场单日航班起降次数。

2.3 轮载作用次数的横向分布

一般认为,飞机轮迹的横向分布可近似为正态

分布,当飞机的主起落架间距大于单块道面板的宽度时,飞机轮载对靠近跑道中线的右侧第一块板的作用曲线函数表达式为

$$f(x) = \frac{1}{d_s \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x+S/2}{d_s} \right)^2} \quad (17)$$

式中: $f(x)$ 为飞机轮载对单块道面板的作用曲线; x 为跑道宽度方向起落架中心到跑道中线的距离; S 为主起落架间距; d_s 为轮迹沿横向的标准差。

跑道左侧板的轮载作用与右侧板对称,故仅以右侧板进行分析即可。需要说明的是,该方法以起落架而非单个机轮作为研究对象,应用有限元建模和其他简化手段求取单组起落架作用于单块道面板的应力值,故只需要考虑起落架的作用次数和作用位置,而不需要计算起落架上所有机轮的轮迹覆盖作用次数或通行覆盖率。

2.4 轮载应力的横向分布

通过有限元建模,计算起落架作用于不同横向位置时产生的轮载应力。该方法求取的应力横向分布曲线与蔡良才等^[31]的简化方法基本吻合,故采用其简化公式,即单块道面板的轮载应力分布为

$$\sigma(x) = \begin{cases} \sigma_Z - \frac{\sigma_Z - \sigma_H}{0.15B} x & 0 \leq x < 0.15B \\ \sigma_H & 0.15B \leq x < 0.85B \\ \sigma_H + \frac{\sigma_Z - \sigma_H}{0.15B} (x - 0.85B) & 0.85B \leq x \leq B \end{cases} \quad (18)$$

式中: $\sigma(x)$ 分别为起落架作用于横向 x 处造成的应力; σ_H 、 σ_Z 分别为起落架作用于横向、纵向板边中点的应力; B 为板宽。

3 疲劳损伤及寿命分析

3.1 疲劳方程

国内外常见机场道面疲劳模型的允许作用次数和应力与允许应力之比的关系如图 6 所示。

图 6 中,美国 NCHRP 1-26 疲劳方程以美国陆军工程兵团(COE)足尺试验和美国州际公路工作者协会(AASHTO)在伊利诺伊州的试验路数据为基础,采用有限元方法计算应力,同时考虑轮载应力与温度应力。本文计算应力的方法与其是一致的,能较好地适应该疲劳方程,并采用该方程进行疲劳寿命预测,即

$$N = \begin{cases} 10^{-1.713} 6e^{+284} & e > 1.25 \\ 10^{2.812} 7e^{-1.2214} & e \leq 1.25 \end{cases} \quad (19)$$

$$e = \frac{\sigma}{f_t} \quad (20)$$

式中: N 为板 50% 开裂的作用次数,即允许作用次数; f_t 为道面板弯拉强度; σ 为飞机一次通行过程中

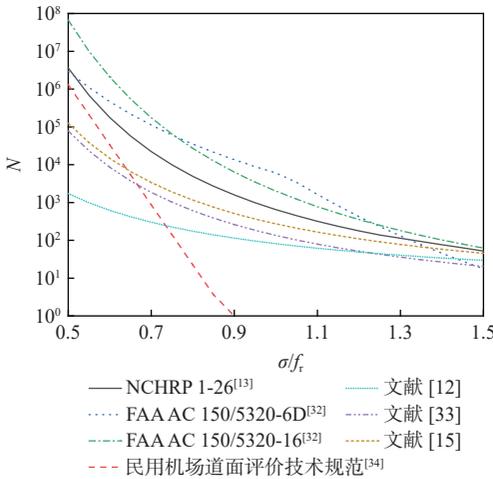


图 6 疲劳模型比较

Fig. 6 Comparison of fatigue models

板边中点最大应力, 为考虑横向分布的轮载应力与基于时间变化的温度应力之和。

3.2 道面剩余寿命计算模型

根据 Miner 损伤原理, 可将不同机型在不同情况下对道面的疲劳损伤值进行累加, 得到累计疲劳损伤因子 C_{DF} , 并定义当 $C_{DF} < 1$ 时道面未达到疲劳损坏, $C_{DF} \geq 1$ 时道面达到疲劳损坏。综合考虑机型、温度、时间、横向分布等因素的累计损伤因子如下:

$$C_{DF} = \sum \frac{n_{i,j,k,l}}{N_{i,j,k,l}} \quad (21)$$

式中: $n_{i,j,k,l}$ 和 $N_{i,j,k,l}$ 分别为在 i, j, k, l 条件下机场道面受到的轮载作用次数和允许作用次数; i 为飞机类型; j 为月份; k 为时刻; l 为横向位置。

由式(21)可得到机场道面运行至今的累计损伤量, 并可由最近一年内各机型造成的累计损伤量 C_{DF-y} 和预测航班量增幅 d , 采用趋势外推法预测机场道面的剩余使用寿命 p , 则机场的剩余使用寿命与累计损伤量的关系为

$$\frac{1 - C_{DF}}{C_{DF-y}} = \sum_{i=1}^{[p]} (1+d)^i + (p - [p]) (1+d)^{[p]+1} \quad (22)$$

3.3 算例分析

以 1.3 节华北地区某机场为例, 该机场的主要机型为空客 320 系列和波音 737 系列。根据机场提供的 2019 年该跑道的航班起降数据, 考虑起降架次、起落架构型和最大起飞重量等因素, 以 A320 和 B737-800 作为设计机型, 其起降架次分别为 19 993 架次和 43 740 架次。参考轮迹测试相关的研究成果^[35], 2 种机型对应的轮迹分布函数分别为

$$f_{A320}(x) = \frac{1}{1.2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x+3.8}{1.2} \right)^2} \quad (23)$$

$$f_{B737-800}(x) = \frac{1}{1.2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x+2.86}{1.2} \right)^2} \quad (24)$$

应用有限元求取轮载应力, 结果如表 4 所示^[17]。

对应的轮载应力函数按式(18)计算。将轮载应力与温度应力叠加, 代入疲劳损伤公式即可得到道面板的损伤函数。按图 7 所示计算流程, 可以得到 2019 年内造成的该跑道累计损伤量 $C_{DF-2019}$ 为 0.099 7。根据机场运行至今的飞机起降数据, 并假定飞机的主要机型比例不变, 则可得到机场跑道运营至今的累计损伤因子 C_{DF} 为 0.802 5。

表 4 轮载应力计算结果^[17]

机型	σ_H	σ_z
A320	1.819	2.121
B737-800	2.388	3.432

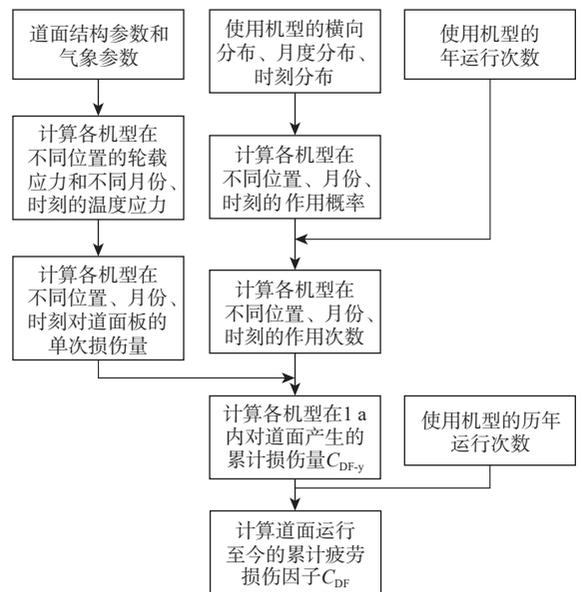


图 7 累计损伤计算流程

Fig. 7 Flow diagram of cumulative damage calculation

在该机场的跑道检测评估中, 假定每年的航空业务量增长 10%, 由钻芯取样检测和 FAARFIELD 软件预测的该机场跑道道面结构剩余使用寿命为 1.57 a; 若按照本文方法同样以 10% 的航空业务增长比例进行计算, 得到的剩余寿命为 1.74 a。同时, 鉴于该跑道病害增多、强度降低等问题, 该机场管理部门在 1 a 后对跑道进行了“白改黑”维护。本文方法的预测结果与检测结果、跑道实际运营情况十分接近, 可以佐证该方法的准确性。

4 结论

1) 以传热学和气象学为理论基础的方法模拟机场道面结构温度场, 并求取温度应力。该方法规避了现有统计分析法不适用于板厚较大的道面板的问题, 可以得到任意厚度的道面板在不同气象条

件下温度应力的数值解。

2) 计算得到的 38 cm 厚水泥混凝土道面板温度应力最大值出现在夜间。由于厚板的延迟效应明显,导致温度应力的变化曲线较大地滞后于气温和辐射曲线。在分析机场道面结构温度应力时,不宜直接采用等效温度应力,而需要考虑该因素的影响。

3) 建立一种考虑了温度应力影响的道面板累计损伤分析模型。该模型可应用于既有机场水泥混凝土道面结构的剩余寿命预测评估,也可为新大尺寸机场水泥混凝土道面结构的研究和设计提供参考。

4) 该模型中的温度应力随月度、时刻等时间因素变化,轮载应力随横向位置变化。由此将该模型中的轮载作用次数按横向、月度、时刻分布,并提出大型机场轮载作用次数与时刻关系的简化公式。

参考文献 (References)

- [1] BARBER E S. Calculation of maximum pavement temperatures from weather reports[R]. Washington, D. C. : National Academy of Sciences National Research Council, 1957: 1-8.
- [2] 严作人. 层状路面体系的温度场分析[J]. 同济大学学报, 1984(3): 76-85.
YAN Z R. Analysis of the temperature field in layered pavement system[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 1984(3): 76-85(in Chinese).
- [3] 吴赣昌. 层状路面体系温度场分析[J]. 中国公路学报, 1992, 5(4): 17-25.
WU G C. The analysis of pavement temperature field of multi-layer system[J]. China Journal of Highway and Transport, 1992, 5(4): 17-25(in Chinese).
- [4] 中交公路规划设计院有限公司. 公路水泥混凝土路面设计规范: JTG D40—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
China Communications Highway Planning and Design Institute Co., Ltd. Specification of cement pavement design of highway: JTG D40—2011[S]. Beijing: China Communications Press, 2011(in Chinese).
- [5] 谈至明, 姚祖康, 刘伯莹. 水泥混凝土路面的温度应力分析[J]. 公路, 2002(8): 19-23.
TAN Z M, YAO Z K, LIU B Y. Analysis of thermal stresses in cement concrete pavements[J]. Highway, 2002(8): 19-23(in Chinese).
- [6] 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 Q S, ZHAO H D, LING J M. Method of airport concrete pavement design for large military transport aircraft[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(1): 121-126(in Chinese).
- [7] CAI L C, ZHU Z Q, WU A H, et al. Cement concrete pavement design based on cumulative damage factor[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(4): 1-8.
- [8] 吴爱红, 蔡良才, 顾强康, 等. 适应未来大型飞机的水泥混凝土道面设计方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(9): 1169-1175.
WU A H, CAI L C, GU Q K, et al. Airport concrete pavement design for large aircraft in future[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(9): 1169-1175(in Chinese).
- [9] 翁兴中, 谭麦秋, 黄小明, 等. 机场水泥混凝土道面板尺寸的确定方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2003, 4(6): 11-13.
WENG X Z, TAN M Q, HUANG X M, et al. Calculating method of size of large cement concrete slab[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2003, 4(6): 11-13(in Chinese).
- [10] 田波, 权磊, 牛开民. 不同基层类型水泥混凝土路面温度翘曲结构试验与理论分析[J]. 中国公路学报, 2014, 27(6): 17-26.
TIAN B, QUAN L, NIU K M. Structural experiment and theoretical analysis of thermal curling in JPCP with different base types[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(6): 17-26(in Chinese).
- [11] 赵鸿铎, 马鲁宽. 基于实测数据的机场水泥道面变温效应分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(12): 1764-1771.
ZHAO H D, MA L K. Investigation into effects of temperature variations on airport cement pavements based on measured data[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(12): 1764-1771(in Chinese).
- [12] FOXWORTHY P T. Concepts for the development of a non-destructive testing and evaluation system for airfield pavements [D]. Urbana-Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign, 1985.
- [13] THOMPSON M R, BARENBERG E J. Calibrated mechanistic structural analysis procedure for pavements[R]. Washington, D. C. : National Research Council, 1992.
- [14] KHAZANOVICH L, DARTER M. Lessons learned from MEPDG development: A confession of the JPCP MEPDG developers[C]// Proceedings of the 10th International Conference on Concrete Pavements. Bridgeville: International Society for Concrete Pavements, 2012: 1-16.
- [15] DARTER M, KHAZANOVICH L, YU T, et al. Reliability analysis of cracking and faulting prediction in the new mechanistic-empirical pavement design procedure[J]. Transportation Research Record:Journal of the Transportation Research Board, 2005, 1936(1): 150-160.
- [16] 权磊, 田波, 冯德成, 等. 水泥混凝土板硬化温度翘曲正向计算方法研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(4): 121-128.
QUAN L, TIAN B, FENG D C, et al. Forward calculation method to determine built-in thermal curling of concrete slabs[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(4): 121-128(in Chinese).
- [17] 张献民, 李梦晓, 陈宇, 等. 机场跑道水泥混凝土道面板尺寸分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(4): 551-559.
ZHANG X M, LI M X, CHEN Y, et al. Research on size of cement concrete pavement of airport runway[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(4): 551-559(in Chinese).
- [18] XU B S, ZHANG W Z, MEI J. Optimization of structure parameters of airfield jointed concrete pavements under temperature gradient and aircraft loads[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, 2019: 3251590.
- [19] 宋福春, 才华, 于铃, 等. 沥青路面非线性瞬态温度场的分析[J]. 沈阳建筑工程学院学报(自然科学版), 2003(4): 264-267.
SONG F C, CAI H, YU L, et al. Analysis of nonlinear transient temperature field in asphalt pavement[J]. Journal of Shenyang Ar-

- chitecture and Civil Engineering University (Natural Science), 2003(4): 264-267(in Chinese).
- [20] 孙丽娟. 考虑层间接触的半刚性基层沥青路面热应力耦合分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
SUN L J. Analysis on the thermal stress of the semi-rigid base and pavement with contact model[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013(in Chinese).
- [21] EPHRATH J E, GOUDRIAAN J, MARANI A. Modelling diurnal patterns of air temperature, radiation, wind speed and relative humidity by equations from daily characteristics[J]. Agricultural Systems, 1996, 51(4): 377-393.
- [22] 余卫东, 汤新海. 气温日变化过程的模拟与订正[J]. 中国农业气象, 2009, 30(1): 35-40.
YU W D, TANG X H. Simulation and modification of daily variation of air temperature[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(1): 35-40(in Chinese).
- [23] ZUO G. Impacts of environmental factors on flexible pavements [D]. Knoxville: University of Tennessee, Knoxville, 2003.
- [24] 谈至明, 邹晓翎, 刘伯莹. 路面温度场的数值解及几个关键问题探讨[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(3): 374-379.
TAN Z M, ZOU X L, LIU B Y. Numerical solution to pavement temperature fields and discussion on several key issues[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(3): 374-379(in Chinese).
- [25] 刘森元, 黄远锋. 天空有效温度的探讨[J]. 太阳能学报, 1983, 4(1): 63-68.
LIU S Y, HUANG Y F. Discussion on effective sky temperature[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 1983, 4(1): 63-68(in Chinese).
- [26] 中国气象局气象信息中心气象资料室. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京: 中国建筑出版社, 2005.
Meteorological Data Room of China Meteorological Administration Meteorological Information Center. Special meteorological dataset for building thermal environment analysis in China[M]. Beijing: China Architecture Press, 2005(in Chinese).
- [27] 周正峰, 凌建明. 基于ABAQUS的机场刚性道面结构有限元模型[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(3): 39-44.
ZHOU Z F, LING J M. Finite element model of airport rigid pavement structure based on ABAQUS[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(3): 39-44(in Chinese).
- [28] 张献民, 刘小兰, 张子文. 基于振动特性的机场刚性道面传荷性能[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(9): 1787-1796.
ZHANG X M, LIU X L, ZHANG Z W. Rigid pavement load transfer ability of airport based on vibration characteristics[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(9): 1787-1796(in Chinese).
- [29] 谈至明, 姚祖康. 非线性温度场下的水泥混凝土路面温度应力[J]. 中国公路学报, 1993, 6(4): 9-17.
TAN Z M, YAO Z K. Thermal stress in cement concrete pavements with non-linear temperature regime[J]. China Journal of Highway and Transport, 1993, 6(4): 9-17(in Chinese).
- [30] 李雄, 陈晓清, 李冬宾, 等. 航班起降波形分类及特征研究[J]. 飞行力学, 2016, 34(2): 90-94.
LI X, CHEN X Q, LI D B, et al. Classification and characteristics of flights taking off and landing waveforms[J]. Flight Dynamics, 2016, 34(2): 90-94(in Chinese).
- [31] 蔡良才, 王海服, 张罗利, 等. 基于累积损伤的机场道面剩余寿命预测模型[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(4): 1-6.
CAI L C, WANG H F, ZHANG L L, et al. Prediction model of remaining life for airport pavement based on cumulative damage[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(4): 1-6(in Chinese).
- [32] Federal Aviation Administration. Airport pavement design and evaluation: AC 150/5320-6D[S]. Washington, D.C.: US Government Printing Office, 2004.
- [33] DARTER M. Concrete slab vs beam fatigue models[C]//Proceedings of the Second International Workshop on the Theoretical Design of Concrete Pavement. Ede: Netherlands Centre for Res & Contract Standardiza, 1995.
- [34] 中国民用航空局. 民用机场水泥混凝土道面设计规范: MH/T 5004—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
Civil Aviation Administration of China. Specifications for airport cement concrete pavement design: MH/T 5004—2010[S]. Beijing: China Communications Press, 2010(in Chinese).
- [35] 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 G Y, ZHANG Y Y, ZHOU H. 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(in Chinese).

Influence of temperature stress on fatigue damage of airfield pavement slab

ZHANG Xianmin^{1*}, NIE Pengfei¹, GAO Zhibin², BAO Yiting¹, LI Changhui¹

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

2. Tianjin Binhai International Airport Co., Ltd., Tianjin 300300, China)

Abstract: At present, temperature stress is not calculated in the design of airfield cement concrete pavement in China. The finite element model is established to simulate the temperature field of the structure and analyze the temperature stress of the slab using the case of an airport in North China, its meteorological data, and the application of heat transfer theories in road engineering and airfield engineering. The results show that there is a large lag between the atmospheric temperature curve, the radiation curve, and the temperature stress curve of the slab bottom, which leads to the maximum temperature stress occurring at 19 to 20. We may examine the cumulative damage and remaining life of the airport pavement by superimposing the temperature stress, which varies with time, and the gear stress, which varies with transverse position, and dividing the number of gear load actions according to transverse position, month, and hour. The results show that the residual life of the airfield pavement analyzed by this method is close to the prediction result of core sampling and FAARFIELD, as well as the actual continuous operation time of the pavement. This method above can be used to calculate the temperature stress of the slab with large thickness, predict and evaluate the residual life of the existing airfield pavement structure, and is a reference for the research and design of the large-size airfield pavement structure.

Keywords: airport engineering; cement concrete pavement slab; temperature stress; gear load action; cumulative damage; fatigue life

Received: 2021-12-03; **Accepted:** 2022-04-19; **Published Online:** 2022-06-09 08:48

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20220607.1647.001.html

Foundation items: Advisory Research Project of the Chinese Academy of Engineering (2019C1-0002); Natural Science Foundation of Tianjin Education Commission (2018KJ245); Enterprise Science and Technology Commissioner Project of Tianjin Technology Innovation Fund (21YDTPJC00470)

* **Corresponding author.** E-mail: cauczxm@126.com