http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2020.0646

机场跑道水泥混凝土道面板尺寸分析

张献民*, 李梦晓, 陈宇, 李长辉, 徐博庆
(中国民航大学 交通科学与工程学院, 天津 300300)

摘 要: 中国机场通常采用板宽不超过5 m的水泥混凝土道面板,国际上已有机场采用板宽6 m以上的水泥混凝土道面板。相比大尺寸水泥混凝土道面板,小尺寸道面板容易产生病害。为了研究道面板尺寸对道面性能的影响,基于弹性层状理论体系建立道面结构有限元模型,通过改变水泥混凝土道面板平面尺寸,研究了考虑温度梯度时飞机荷载作用下道面板内的应力变化。通过某机场实例分析了温度梯度和飞机荷载共同作用下道面板平面尺寸对道面使用寿命的影响,结果表明:道面板内应力受温度梯度影响较大,常见机型荷载作用下,夏季道面板内拉应力25%以上是由温度梯度荷载造成;不同尺寸道面板在相同荷载作用下,道面产生的损伤量不同,设计过程中加入道面板温度应力计算,选择合适的道面板尺寸,可以显著提高水泥混凝土道面的预期使用寿命。

关 键 词: 道面板尺寸; 温度梯度; 临界荷载; 累积损伤; 疲劳寿命
中图分类号: V351.11
文献标志码: A **文章编号**: 1001-5965(2022)04-0551-09

中国现行的民用机场水泥混凝土道面设计规范中没有专门针对道面板平面尺寸计算的部分,国内机场一般依经验选用尺寸为4.5 m×5 m或5 m×5 m宽的道面板。现行规范要求分块宜使主要飞机的主起落架从道面板中部通过,常见民航客机的主起落架间距为5~10 m,飞机滑行时会发生横向偏移现象,采用宽度为4.5 m或5 m的道面板会使飞机轮载更多作用在板缝处。对于常见的45 m和60 m宽水泥混凝土跑道,一般横向至少布置十块道面板,有较多板缝,增加了发生错台的概率,因此,板边和板角也是水泥混凝土道面板最易发生损坏的位置。减少板缝最直接的方式就是增大道面板尺寸,国际上已有机场采用宽度尺寸在6 m以上的水泥混凝土道面板。选用尺寸合适的道面板可提升飞机在道面上滑行的舒适性和安全性,因此,在设计过程中加入对水泥混凝土道面板尺寸的设计具有十分重要的意义。

翁兴中等[1]通过计算不同尺寸和厚度道面板的温度应力,认为同样环境和板厚下,温度应力决定了道面板的尺寸。孙道胜等[2]从混凝土材料入手,研究了在半刚性基层上扩大道面板尺寸的方法。傅明国等[3]结合工程实践,论述了大尺寸水泥混凝土道面板的质量控制措施。黄凯健等[4]在纤维混杂微膨胀混凝土大尺寸面板内部埋设应变计,总结了其应变变化规律。高志斌[5]通过等效荷载的方法,研究了水泥混凝土道面板温度应力与板块尺寸及板厚的关系,建议板长与板厚之比应大于13且小于20。

对水泥混凝土道面板尺寸的研究大多从道面板内部温度应力变化和水泥混凝土材料的角度出

收稿日期: 2020-11-20; **录用日期**: 2020-12-11; **网络出版时间**: 2020-12-15 15:59
网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20201215.1557.001.html
基金项目: 中国工程院重点资询项目(2019C1-0002); 天津市教委科研计划(2019KJ122); 中国民航机场工程研究基地开放基金(205016010411,205016010413); 中国民航大学科研启动基金(2020KYQD37)
* **通信作者**. E-mail: cauczxm@126.com

引用格式: 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. Size of cement concrete pavement slab of airport runway[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(4): 551-559 (in Chinese).

发,很少进行有关水泥混凝土道面板尺寸和道面疲劳寿命之间关系的研究。因此,本文使用数值模拟的方法,分析不同尺寸道面板在荷载和温度梯度共同作用下道面最大拉应力的变化情况,结合工程实际研究道面板尺寸对道面使用寿命的影响,探讨在水泥混凝土道面板设计过程中,加入温度梯度荷载计算和道面板平面尺寸设计的必要性。

1 有限元模型建立

1.1 道面参数

基于 ABAQU 有限元软件建立跑道全宽为 45 m的足尺实体模型,板块布置形式为8种,中线附近主要受荷板宽度分别为 4.5 m、5 m、5.5 m、6 m、6.5 m、7 m、7.5 m 和8 m,跑道两侧位置道面板采用其他尺寸,以满足不同模型道面的宽度均为 45 m。8 种模型由跑道左侧至右侧横向布置形式分别为:10 块 4.5 m×5 m 板;1 块 7.5 m×5 m 板,6 块 5 m×5 m 板,1 块 7.5 m×5 m 板;1 块 6 m×5.5 m 板,6 块 5.5 m×5.5 m 板,1 块 6 m×5.5 m 板;1 块 4.5 m×6 m 板,6 块 6 m×6 m 板,1 块 4.5 m×6 m 板;2 块 4.75 m×6.5 m 板,4 块 6.5 m×6.5 m 板,2 块 4.75 m×6.5 m 板;1 块 8.5 m×7 m 板,4 块 7 m×7 m 板,1 块 8.5 m×7 m板;6 块 7.5 m×7.5 m 板,1 块 6.5 m×8 m 板,4 块 8 m×8 m 板,1 块 6.5 m×8 m 板。纵向布置三排道面板,三排道面板横向布置方式相同。边界条件为:面层、基层及土基侧面设置 x、y 两方向位移为 0;土基底面设置 x、y、z 三个方向位移为 0。道面板和基层层间法向无黏结,切向采用库伦摩擦方程表征,摩擦系数取值为 1.5,基层与土基完全黏结[6]。传力杆和纵缝拉杆按照现行规范布置,横缝传荷系数为 0.95,纵缝传荷系数为 0.75,其余道面结构参数如表 1 所示[7]。

表 1 道面结构参数[7]

Table 1 Parameters of pavement structure[7]

参数	水泥混凝土面层	水泥稳定碎石基层	土基
厚度/m	0.38	0.40	10
弹性模量/MPa	38 000	1 500	90
密度/(kg·m^{-3})	2 500	2 000	1 800
泊松比	0.15	0.25	0.35

1.2 飞机荷载

飞机荷载采用国内常见的 A320 和 B737-800 机型进行加载。飞机荷载通过机轮传递到道面上,绝大多数荷载由主起落架承担,一般通过主起落架荷载分配系数计算飞机单轮荷载,表达式为

$$P = \frac{\rho G}{m} \tag{1}$$

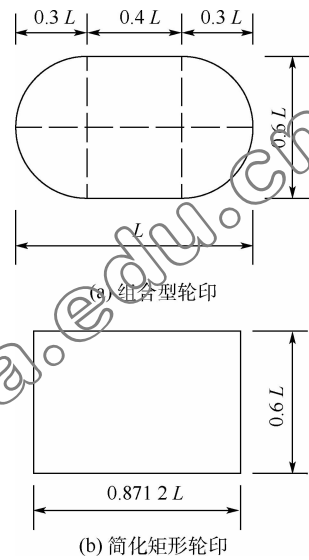
式中:P 为飞机主起落架单轮荷载;ρ 为主起落架荷载分配系数;G 为飞机荷载,通常采用飞机最大起飞重量;m 为主起落架机轮个数。

一般在机场道面设计中采用组合型轮迹,把轮印假定为 2 个半圆和矩形的组合,为了方便有限元模型的建立和模型计算精度,可根据面积等效原则,把轮印简化为矩形[8],如图 1 所示。轮印面积和尺寸按照式(2)和式(3)计算。A320 和 B737-800 的主起落架构型如图 2 所示,其他飞机计算参数如表 2 所示。

$$A = \frac{P}{1\,000q} \tag{2}$$

$$L = \sqrt{\frac{A}{0.522\,7}} \tag{3}$$

式中:A 为单个飞机轮印面积;q 为飞机轮胎胎压;L 为轮印长度。

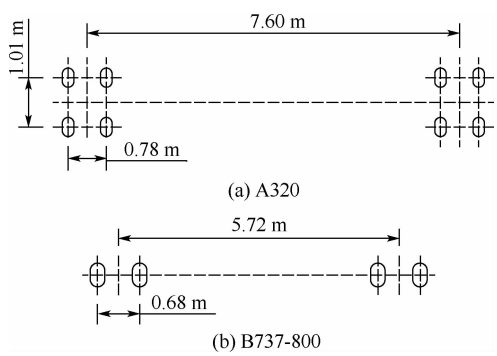


(a) 组合型轮印

(b) 简化矩形轮印

图 1 轮印形状

Fig. 1 Wheel tread profile



(a) A320

(b) B737-800

图 2 A320 和 B737-800 主起落架构型

Fig. 2 Main gear configuration of A320 and B737-800

http://bhxb.buaa.edu.cn

表 2　飞机参数

Table 2　Aircraft parameters

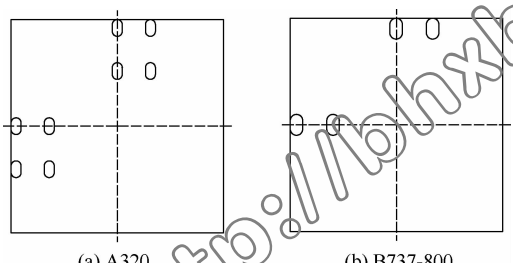
参数	A320	B737-800
最大起飞重量/kN	770.00	790.04
主起落架荷载分配系数	0.95	0.95
主起落架个数	2	2
主起落架间距/m	7.60	5.72
主起落架构型	双轴双轮	单轴双轮
主起落架轮距/m	0.78/1.01	0.86
主起落架胎压/MPa	1.14	1.47
主起落架单轮荷载/kN	91.44	187.63
主起落架轮印面积/m^2	0.080	0.128
主起落架轮印长度/m	0.392	0.494
0.871 2L/m	0.341	0.431
0.6L/m	0.235	0.296

2　道面板应力分析

水泥混凝土道面板内温度应力与板的尺寸相关，尺寸发生变化，温度应力也随之发生改变，采用有限元法计算道面温度应力，结果较为精确[1,9-10]。

温度梯度作用下，水泥混凝土道面板产生翘曲温度应力。中国不同地区自然条件差异较大，水泥混凝土道面温度梯度各不相同，可根据公路自然区划确定水泥混凝土道面温度梯度[11]。道面板产生最大荷载应力的临界荷位在板纵缝或横缝中部，如图 3 所示。

通过有限元软件计算不同公路自然区划 38 cm厚水泥混凝土道面在飞机临界荷载和温度梯度共同作用下，道面板产生的最大拉应力。不同公路自然区划 38 cm 厚水泥混凝土道面板最大温度梯度如表 3 所示，水泥混凝土线膨胀系数为 1×10^{-5}/℃。飞机荷载作用在各尺寸道面板横缝及纵缝临界荷位时的板边最大拉应力如图 4 所示。



(a) A320　(b) B737-800

图 3　临界荷位

Fig. 3　Critical load position

表 3　不同公路自然区划 38 cm 水泥混凝土面层温度梯度

Table 3　Temperature gradient of 38 cm cement concrete pavement with different natural zoning for highways

公路自然区划	Ⅱ、Ⅴ	Ⅲ	Ⅳ、Ⅵ	Ⅶ
温度梯度/(℃ · m^{-1})	52.3	56.7	54.2	58.0

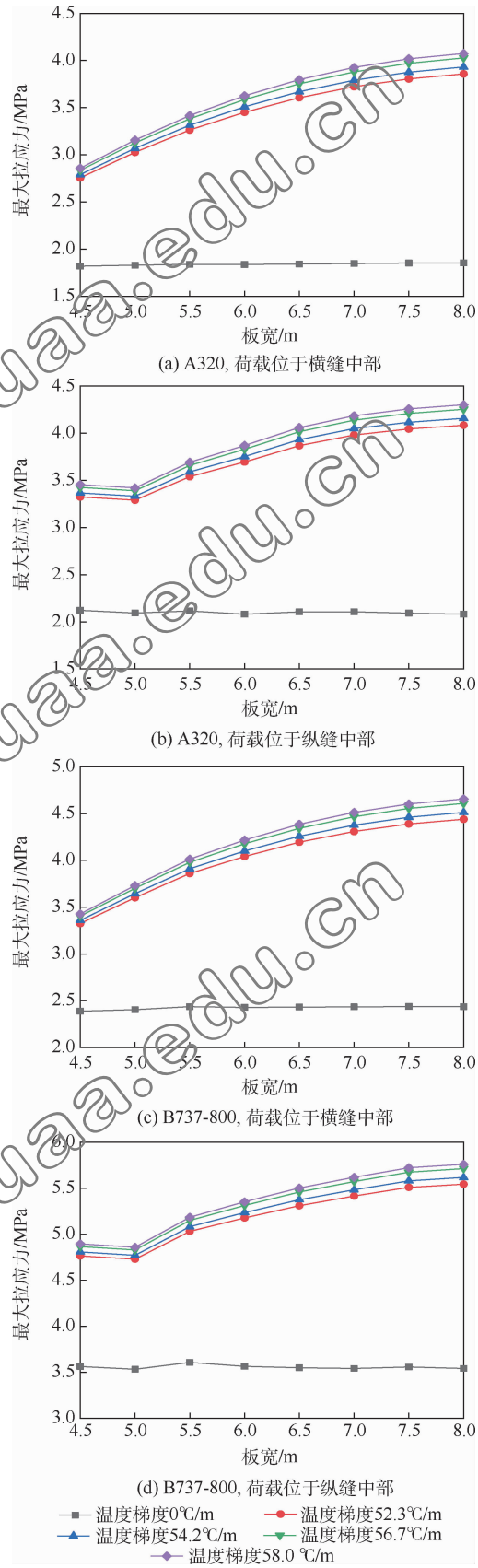


图 4　不同尺寸道面板板边应力曲线

Fig. 4　Edge stress curves of different sizes of pavement slab

无温度梯度时，相同飞机荷载作用下，各尺寸道面板产生的应力基本一致；存在温度梯度

http://bhxb.buaa.edu.cn

时,随着尺寸增大,板内最大拉应力逐渐增加,因为在相同温度梯度作用下,无约束的道面板尺寸越大发生的翘曲变形越大,施加约束后变形大的道面板产生的温度应力更大,所以尺寸大的道面板产生的总应力更大;宽度为 4.5 m 和 5 m 道面板的长度都为 5 m,因此飞机荷载作用在纵缝临界荷位时,这 2 种道面板产生的最大拉应力基本保持一致。因为道面板纵缝传荷能力低于横缝,所以同一机型作用在道面板纵缝产生的最大拉应力大于作用在横缝产生的拉应力。B737-800 主起落架构型为单轴双轮,导致 B737-800 作用在纵缝产生的拉应力远大于横缝产生的拉应力[12]。

不同温度梯度和飞机荷载共同作用下,各尺寸道面板板边应力如表 4 和表 5 所示。4.5 m 宽道面板,在温度梯度和飞机荷载共同作用下,板底最大拉应力为 4.896 MPa,随着板尺寸增大,板底最大拉应力逐渐增大,当道面板宽度达到 8 m 时,板底最大拉应力达到 5.761 MPa。飞行区等级指标Ⅱ在 C 以上的机场,水泥混凝土设计弯拉强度为 5 MPa。在实际情况中,更大的飞机荷载,如 A380 和 B747 等机型作用在道面或更高的温度梯度产生时,道面板底最大拉应力将进一步增大,即使是尺寸较小的 4.5 m 道面板,飞机荷载和温度梯度共同作用时产生的板底最大拉应力将超过 5 MPa。因此,为防止道面板受拉开裂,可考虑在道面中线两侧的主要受荷板布置钢筋或钢丝网,分担道面板产生的拉应力,或增加道面板厚度,从而减小道面板产生的应力。如表 4 和表 5 所示,4.5 m宽道面板考虑温度梯度和不考虑温度梯度时,飞机临界荷载作用下不同地区道面板产生的最大拉应力差值约在 1 MPa,占总应力的 25% ~ 35%。随道面板尺寸的增大,考虑温度梯度和不考虑温度梯度时产生的最大拉应力差值越来越大,道面板宽度为 8 m 时,差值最大达到 2.447 MPa,占总应力一半以上。因为随着道面板尺寸增加,板内温度应力逐渐增大,但由飞机荷载产生的板内应力并不随道面板尺寸变大而增加,所以随着板尺寸的增加,温度应力占板内应力的比例越来越高。

表 4 A320 飞机荷载作用下不同尺寸道面板板边应力

Table 4 Edge stresses of different sizes of pavement slabs under load of A320 aircraft

板宽/m	温度梯度 0℃/m		温度梯度 52.3℃/m		温度梯度 56.7℃/m		温度梯度 54.2℃/m		温度梯度 58.0℃/m	
	横向边应力/MPa	纵向边应力/MPa	横向边应力/MPa	纵向边应力/MPa	横向边应力/MPa	纵向边应力/MPa	横向边应力/MPa	纵向边应力/MPa	横向边应力/MPa	纵向边应力/MPa
4.5	1.819	2.121	2.756	3.324	2.835	3.425	2.790	3.367	2.858	3.455
5	1.829	2.093	3.026	3.290	3.126	3.390	3.069	3.333	3.156	3.420
5.5	1.839	2.115	3.263	3.539	3.382	3.658	3.314	3.590	3.417	3.693
6	1.837	2.081	3.451	3.695	3.586	3.830	3.509	3.753	3.626	3.870
6.5	1.842	2.105	3.605	3.868	3.753	4.016	3.669	3.932	3.797	4.060
7	1.847	2.106	3.722	3.981	3.879	4.138	3.79	4.049	3.926	4.185
7.5	1.852	2.092	3.805	4.045	3.97	4.21	3.876	4.116	4.018	4.258
8	1.854	2.081	3.858	4.085	4.027	4.254	3.931	4.158	4.074	4.301

表 5 B737-800 飞机荷载作用下不同尺寸道面板板边应力

Table 5 Edge stresses of different sizes of pavement slabs under load of B737-800 aircraft

板宽/m	温度梯度 0℃/m		温度梯度 52.3℃/m		温度梯度 56.7℃/m		温度梯度 54.2℃/m		温度梯度 58.0℃/m	
	横向边应力/MPa	纵向边应力/MPa	横向边应力/MPa	纵向边应力/MPa	横向边应力/MPa	纵向边应力/MPa	横向边应力/MPa	纵向边应力/MPa	横向边应力/MPa	纵向边应力/MPa
4.5	2.388	3.462	3.325	4.665	3.404	4.766	3.359	4.708	3.427	4.796
5	2.404	3.432	3.601	4.629	3.701	4.729	3.644	4.672	3.731	4.759
5.5	2.436	3.507	3.860	4.931	3.979	5.050	3.911	4.982	4.014	5.085
6	2.428	3.464	4.042	5.078	4.177	5.213	4.10	5.136	4.217	5.253
6.5	2.431	3.448	4.194	5.211	4.342	5.359	4.258	5.275	4.386	5.403
7	2.434	3.441	4.309	5.316	4.466	5.473	4.377	5.384	4.513	5.520
7.5	2.437	3.457	4.390	5.410	4.555	5.575	4.461	5.481	4.603	5.623
8	2.436	3.441	4.440	5.445	4.609	5.614	4.513	5.518	4.656	5.661

http://bhxb.buaa.edu.cn

3　道面寿命计算

机场道面在荷载长期作用下有一定的使用寿命,中国现已建成机场在设计时大多采用“设计飞机”法计算道面飞机荷载作用次数,计算时将各不同机型换算成一种“设计飞机”对道面重复作用,假定轮迹在通行宽度内均匀分布。然而,不同机型主起落架构型不同、轮迹横向分布不同,并且飞机轮迹横向分布近似服从正态分布,采用“设计飞机”近似换算的方法会导致计算结果不精确[13-15]。基于 Miner 损伤原理的累积损伤法,进行计算时叠加道面在不同机型作用下产生的损伤,充分考虑不同机型实际对道面造成的损伤情况,计算结果比“设计飞机”法更为准确[16-17]。

3.1　覆盖作用次数

飞机轮迹横向分布近似服从正态分布,国内学者将飞机主起落架轮迹横向分布叠加,得到不同情况下轮迹覆盖作用曲线[18]。

当飞机主起落架构型为单轴单轮时,若两侧主起落架距离大于通行宽度,则两轮迹不重叠,轮迹覆盖作用曲线函数表达式为

$$F_1(x)=\begin{cases}f_1(x)=\dfrac{1}{\sigma_0\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x+S/2}{\sigma_0}\right)^2} & x<0\\ f_2(x)=\dfrac{1}{\sigma_0\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-S/2}{\sigma_0}\right)^2} & x\geqslant 0\end{cases} \tag{4}$$

式中:$F_1(x)$ 为单轴单轮飞机主起落架轮迹不重叠时的轮迹覆盖作用曲线;x 为道面某一点距跑道中线的垂直距离,沿飞机前进方向左侧为负、右侧为正;$f_1(x)$、$f_2(x)$ 分别为单轴单轮飞机左、右起落架轮迹横向分布曲线;σ_0 为飞机滑行时横向偏移标准差;S 为主起落架间距。

当飞机主起落架构型为单轴单轮时,若两侧主起落架距离小于通行宽度,则左、右主起落架轮迹重合,轮迹横向分布曲线为左、右轮迹分布曲线叠加,函数表达式为

$$F_2(x)=f_1(x)+f_2(x)=\frac{1}{\sigma_0\sqrt{2\pi}}\left[\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x+S/2}{\sigma_0}\right)^2}+\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-S/2}{\sigma_0}\right)^2}\right] \tag{5}$$

式中:$F_2(x)$ 为单轴单轮飞机主起落架轮迹重叠时的轮迹覆盖作用曲线。

当飞机主起落架构型为单轴双轮时,主起落架距离一般大于通行宽度,两侧主起落架轮迹不重叠,计算轮迹覆盖作用曲线时,只需将单侧主起落架 2 个轮迹进行线性叠加。

$$f_{21}(x)=\frac{1}{\sigma_0\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}\left[\frac{x-(S-S_t)/2}{\sigma_0}\right]^2} \tag{6}$$

$$f_{22}(x)=\frac{1}{\sigma_0\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}\left[\frac{x-(S+S_t)/2}{\sigma_0}\right]^2} \tag{7}$$

$$F_3(x)=f_{21}(x)+f_{22}(x)=\frac{1}{\sigma_0\sqrt{2\pi}}\left[\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}\left[\frac{x-(S-S_t)/2}{\sigma_0}\right]^2}+\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}\left[\frac{x-(S-S_t)/2}{\sigma_0}\right]^2}\right] \tag{8}$$

式中:$F_3(x)$ 为单轴双轮飞机右侧轮迹覆盖作用曲线;$f_{21}(x)$、$f_{22}(x)$ 分别为右侧起落架内、外机轮的轮迹横向分布作用曲线;S_t 为轮距。

对于多轴单轮、多轴多轮或特殊构型起落架的覆盖作用曲线,可以根据单轮和双轮的覆盖作用曲线叠加确定。

飞机荷载对道面板边产生一次最大应力作用,称对该点进行了一次覆盖,道面覆盖作用次数按式(9)计算[13,19]:

$$N_i(x)=n_iF_i(x)W_i \tag{9}$$

式中:$N_i(x)$ 为第 i 种机型的覆盖作用次数;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。

3.2　温度梯度确定

由第 2 节内容可知,道面板因温度梯度产生的温度应力不能忽视,因此在计算道面使用寿命时,应加入温度梯度荷载。因为道面板不是总处于温度梯度最大的极限状态,大多数机场会在夜间停航,所以在计算道面板使用寿命时,可采用道面板白天平均温度梯度进行应力计算。一天之内道面板温度梯度在午后达到正温差最大,温度梯度变化为正弦函数[10,20],白天温度梯度变化如式(10)所示,可根据式(11)计算出白天平均温度梯度。

$$T_g(t)=T_{g,\max}\sin(\pi t/12) \tag{10}$$

$$T_{ga}=\frac{2}{\pi}T_{g,\max} \tag{11}$$

式中:$T_g(t)$ 为白天温度梯度随时间变化函数;t 为时刻;$T_{g,\max}$ 为公路自然区划中规定的水泥混凝土道面板最大温度梯度;T_{ga} 为水泥混凝土道面板白天平均温度梯度。

3.3　允许作用次数确定

道面允许作用次数就是道面的疲劳寿命,根据道面板荷载应力和疲劳方程可求出道面允许作用次数。

对荷载作用下的道面板进行应力分析,将道面纵向各点的最大拉应力映射到横向边,板内横向最大应力分布可简化为分段函数,单块道面板 x 位置的应力为道面板宽度 B 的周期函数见

http://bhxb.buaa.edu.cn

式(12),应力分布情况如图 5 所示[18-19]。

$$\sigma(x) = \begin{cases} \sigma_Y - \dfrac{(\sigma_Y - \sigma_X)x}{0.15B} & 0 \leqslant x < 0.15B \\ \sigma_X & 0.15B \leqslant x \leqslant 0.85B \\ \sigma_X + \dfrac{(\sigma_Y - \sigma_X)(x - 0.85B)}{0.15B} & 0.85B < x \leqslant B \end{cases} \tag{12}$$

式中:$\sigma(x)$为距纵缝 x 处板边应力;σ_X、σ_Y 分别为温度梯度和飞机临界荷载共同作用下道面板横、纵向边最大拉应力,MPa;B 为道面板宽度。

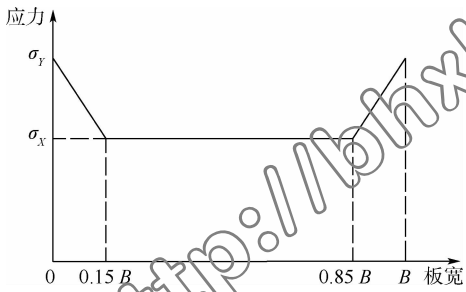


图 5 板边最大应力分布[18-19]

Fig. 5 Distribution of maximum stress at the edge of pavement slab[18-19]

美国 NCHRP1-26 疲劳方程采用有限元的计算方法,充分融合实验和理论研究成果,考虑了荷载和温度的作用,与实际状态接近。荷载应力通过有限元软件模拟得到,同时考虑板内温度应力,可采用 NCHRP1-26 疲劳方程,根据式(13)计算道面板在第 i 种机型作用下位置 x 处的疲劳寿命,即该位置的允许作用次数[21]。

$$N_{ri}(x) = \begin{cases} 10^{-1.713\,6u + 4.284} & u > 1.25 \\ 10^{2.812\,7u - 1.221\,4} & u \leqslant 1.25 \end{cases} \tag{13}$$

$$u = \frac{\sigma(x)}{f_r} \tag{14}$$

式中:$N_{ri}(x)$为道面板设计寿命期内第 i 种机型的允许作用次数;f_r 为道面设计弯拉强度;u 为应力比。

3.4 累积损伤量

根据 Miner 定理,机场水泥混凝土道面在不同机型荷载作用下,受到的累积损伤可以线性相加,得到累积损伤曲线。在第 i 种机型作用下,飞机荷载对水泥混凝土道面的疲劳消耗是该机型覆盖作用次数 N_i 与允许作用次数 N_{ri} 的比值,将不同机型对道面板的疲劳消耗进行叠加,得到道面横向各位置的累积损伤因子(cumulative damage factor, CDF)[19,21-22],表达式为

$$\mathrm{CDF}(x) = \sum_{i=1}^{k} \frac{N_i(x)}{N_{ri}(x)} \tag{15}$$

根据各位置 CDF 值大小可判断道面的损伤情况。如果 CDF < 1,说明道面未达到疲劳破坏极限状态;如果 CDF ≥ 1,说明道面达到疲劳破坏极限状态。

3.5 实例计算

为研究道面板尺寸对道面寿命的影响,分别计算某机场道面板宽度为 4.5 m、5 m、5.5 m、6 m、6.5 m、7 m、7.5 m 和 8 m 时的道面板累积损伤量。

某已建成机场飞行区等级 4F,道面结构参数为:水泥混凝土道面板厚度为 38 cm,尺寸为 4.5 m × 5 m,弹性模量为 38 000 MPa,泊松比为 0.15,设计弯拉强度为 5.5 MPa,水泥稳定碎石基层厚度为 40 cm,弹性模量为 1 500 MPa,土基回弹模量为 90 MPa。该机场的主要机型为 A320 和 B737-800,近 5 年的年均起降量分别为 10 454 架次和 22 871 架次,其对应轮迹横向分布函数分别为

$$F_{\mathrm{A320}}(x) = \frac{1}{1.2\sqrt{2\pi}} \left\{ \mathrm{e}^{-\frac{[(x-3.41)/1.2]^2}{2}} + \mathrm{e}^{-\frac{[(x-4.19)/1.2]^2}{2}} \right\} \tag{16}$$

$$F_{\mathrm{B737\text{-}800}}(x) = \frac{1}{1.2\sqrt{2\pi}} \left\{ \mathrm{e}^{-\frac{[(x-2.43)/1.2]^2}{2}} + \mathrm{e}^{-\frac{[(x-3.29)/1.2]^2}{2}} \right\} \tag{17}$$

该地区 38 cm 厚水泥混凝土道面板最大温度梯度为 52.3℃/m,根据式(13)可计算出白天平均温度梯度为

$$T_{\mathrm{ga}} = 2/\pi \times 52.29 = 33.29\text{℃/m} \tag{18}$$

将飞机临界荷载和 33.29℃/m 温度梯度共同作用在道面板上,得到不同板块布置方式的道面板板边应力,如表 6 所示。道面温度梯度在全年随时间发生周期性变化,计算所采用的温度梯度为全年温度梯度最大值,一般出现在七月,假设一个月内温度梯度为定值,则道面板该月损伤量为全年最大值。

表 6 道面板板边最大拉应力

Table 6 Maximum tensile stress at the edge of pavement slab

板宽/m	A320		B737-800	
	横向边应力/MPa	纵向边应力/MPa	横向边应力/MPa	纵向边应力/MPa
4.5	2.581	3.106	3.150	4.447
5	2.807	3.071	3.382	4.410
5.5	3.008	3.284	3.605	4.676
6	3.169	3.413	3.760	4.796
6.5	3.304	3.567	3.893	4.910
7	3.408	3.667	3.995	5.002
7.5	3.483	3.723	4.068	5.088
8	3.531	3.758	4.113	5.118

http://bhxb.buaa.edu.cn

假设该机场每月航班数量一致，则该机场单月主要机型起降架次为：A320 起降 968 次，B737-800 起降 1 906 次，根据式(9)、式(12)、式(13)、式(14)和式(15)计算得到该机场采用不同板块布置方式时温度梯度最大月份的道面单月损伤量，对道面板宽度进行归一化处理，得到中线右侧道面板夏季损伤曲线，如图 6 所示。道面板宽度为 4.5 m 时，道面板最大损伤位置为远离跑道中线的外侧纵向边，其次是靠近跑道中线的内侧纵向边，相比之下板块中部损伤不明显。随着板宽增加，外侧纵向边的损伤量逐渐减小，道面板横向边中部和内侧纵向边的损伤量逐渐增大。板宽达到 6 m 时，道面板横向边中部和内侧纵向边的损伤量超过外侧纵向边。当板宽继续增加到 6.5 m 后，横向边中部超过内侧纵向边的损伤量，成为道面板损伤最严重的部位。因为同一飞机荷载作用在道面板纵向边临界位置时产生的最大拉应力大于作用在横向边临界位置时产生的最大拉应力，且飞机在道面上滑行时，轮迹近似呈正态分布，A320 机型主起落架间距为7.6 m，B737-800 机型主起落架间距为 5.62 m，所以当道面板尺寸较小时，轮载更接近道面板荷载应力更大的外侧纵向边，造成外侧纵边损伤较大。随着道面板尺寸增大，板内温度应力逐渐增加，因此，道面板横向边中部和内侧纵向边的损伤量随着尺寸的增大而不断增加。但由于尺寸增大的过程中，轮载作用位置由外侧逐渐向板中移动，外侧纵向边覆盖作用次数减少，即使板内温度应力增加，外侧纵向边损伤量依旧逐渐减小。因为轮载覆盖作用位置主要在板中，所以当板内应力随尺寸增大而增加时，横边中部比内侧纵向边的损伤量增长的更快，最终横向边中部的损伤量超过内侧纵向边中部，成为道面板损伤最严重的位置。

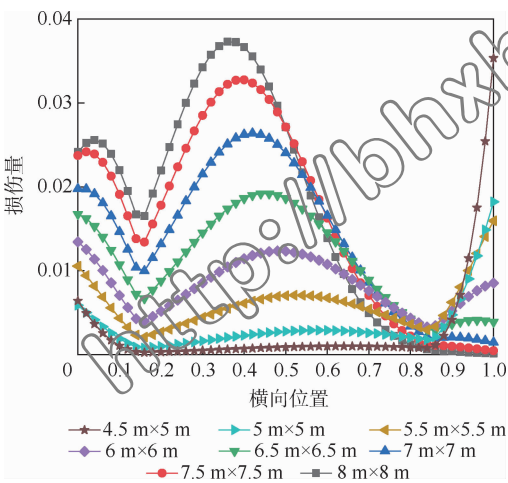


图 6　不同尺寸道面板单月最大损伤量

Fig. 6　Maximum damage of different sizes of pavement slabs in single month

以此可见，相同飞机荷载和温度梯度作用下，道面板尺寸不同的道面，产生的最大损伤量及其损伤位置都不相同。

各板型最大损伤量和损伤位置如表 7 所示。跑道中线两侧道面板宽度为 4.5 m、5 m 和 5.5 m 时，道面最大损伤位置为中线两侧板块远离中线的纵向边；中线两侧道面板宽度为 6 m 时，最大损伤位置为中线两侧板块靠近中线的纵向边；中线两侧道面板宽度为 6.5 m、7 m、7.5 m 和 8 m 时，最大损伤位置为中线两侧板块的横向边中部。该机场采用的 4.5 m×5 m 板块温度梯度最大月份的单月损伤量为 0.035，相同荷载作用下温度梯度最大月份产生损伤最小的板块是 6 m×6 m，单月损伤量为 0.013，比该机场原板块损伤降低了 62.9%，其他板块形式的损伤量相较于原板块均有不同程度的改变，说明选择合适的道面板尺寸有助于提升场道寿命。值得指出的是，提升道面寿命的方法有很多种，可以从增加道面配筋、提升道面板厚度、提高地基强度等多方面进行考虑，本文仅从改变道面板平面尺寸的角度分析提升道面寿命的方法。

表 7　不同尺寸道面板最大损伤量和损伤位置

Table 7　Maximum damage and its occurrence position of different sizes of pavement slabs

板宽/m	最大损伤位置/m	损伤量
4.5	4.5	0.035
5	5.0	0.018
5.5	5.5	0.015
6	0.0	0.013
6.5	2.9	0.019
7	2.9	0.026
7.5	2.9	0.033
8	2.9	0.037

4　结　论

本文采用 ABAQUS 有限元软件进行数值模拟，研究分析了不同温度梯度和飞机荷载下，不同尺寸道面板的应力分布、疲劳寿命和道面损伤量，得出如下结论：

1）随道面板尺寸增大而增加的板内应力，增加部分是因温度梯度而产生的温度应力，道面板尺寸越大，温度应力占板内总应力的比例越大。

2）道面板在夏季较大温度梯度和飞机荷载共同作用下，板底最大拉应力可能超过道面设计弯拉强度，建议在道面中线两侧的主要受荷板布

http://bhxb.buaa.edu.cn

置钢筋或钢丝网分担道面板产生的拉应力,或增加道面板厚度,从而减小道面板产生的应力。

3)相同飞机荷载和温度梯度作用下,不同尺寸道面板产生的最大损伤量及其损伤位置各不相同,这是不同尺寸道面板轮迹覆盖作用间的差异,以及各道面板产生的温度应力不同所导致的。

4)同一机场采用不同尺寸道面板时道面的使用寿命差异明显,建议在水泥混凝土道面设计过程中加入道面板温度应力计算部分,根据道面所在地区,结合不同月份水泥混凝土面板温度梯度和机场预期起降机型及其架次,选择合适的道面板尺寸,从而提升水泥混凝土道面的预期使用寿命。

参考文献(References)

[1] 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),2002,3(6):4-6.
WENG X Z, TAN M Q, HUANG X M, et al. A calculating method of size of large cement concrete slab[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition),2002,3(6):4-6(in Chinese).

[2] 孙道胜,黄小明,邓敏,等. 道面水泥混凝土高性能化和放大道面板尺寸问题初探[J]. 混凝土,2004(5):21-25.
SUN D S, HUANG X M, DENG M, et al. The discuss of pursuing high performance of the pavement cement concrete and magnifying dimension of the pavement slab[J]. Concrete,2004(5):21-25(in Chinese).

[3] 傅明国,陈岩,黄业坤,等. 机场道面大尺寸板块混凝土配合比设计与施工技术[J]. 施工技术,2007,36(2):103-106.
FU M G, CHEN Y, HUANG Y K, et al. Mixture ratio design and construction technology of large size plate concrete at airport pavement[J]. Construction Technology,2007,36(2):103-106(in Chinese).

[4] 黄凯健,邓敏,何大贵,等. 高原地区纤维混杂微膨胀混凝土大尺寸面板[J]. 建筑材料学报,2010,13(4):474-477.
HUANG K J, DENG M, HE D G, et al. Big dimensional pavement slabs with hybrid fiber reinforced micro expansion concrete in plateau[J]. Journal of Building Materials,2010,13(4):474-477(in Chinese).

[5] 高志斌. 温度应力对机场道面板厚度与分块设计影响研究[J]. 建筑结构,2011,41(1):1068-1072.
GAO Z B. Study on the impact of temperature stress on the airport pavement panel thickness and block design[J]. Building Structure,2011,41(1):1068-1072(in Chinese).

[6] 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).

[7] 中国民用航空局. 民用机场水泥混凝土道面设计规范:MH/T5004—2010[S]. 北京:人民交通出版社,2010:23-24.
CACC. Specifications for airport cement concrete pavement design: MH/T5004—2010[S]. Beijing: China Communications Press,2010:23-24(in Chinese).

[8] 刘文,凌建明,赵鸿铎. 考虑接缝影响的机场水泥混凝土道面结构响应[J]. 公路交通科技,2007,24(12):15-18.
LIU W, LING J M, ZHAO H D. Analysis on mechanical responses of rigid airport pavement with load transfer of joints[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2007,24(12):15-18(in Chinese).

[9] 蒋应军,戴经梁. 刚性路面中关于温度应力计算问题[J]. 岩土工程学报,2007,29(6):837-842.
JIANG Y J, DAI J L. Computation of thermal stresses in rigid pavement[J]. Journal of Geotechnical Engineering,2007,29(6):837-842(in Chinese).

[10] 李新凯,侯相深,马松林. 轴载与温度作用下水泥路面板的变形与应力分析[J]. 重庆建筑大学学报,2008,30(5):53-57.
LI X K, HOU X S, MA S L. Deflection and stress analysis of a pavement slab under temperature gradient and axial loading coupling[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University,2008,30(5):53-57(in Chinese).

[11] 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 X Z. Design of airport pavement[M]. 3rd ed. Beijing: China Communications Press,2017:34-39(in Chinese).

[12] KANDEH D S,罗君豪. 典型飞机起落架荷载作用下机场水泥砼道面结构响应分析[J]. 公路与汽运,2019(6):55-57.
KANDEH D S, LUO J H. Analysis of airport cement concrete pavement structure response under the load of typical aircraft landing gear[J]. Highways and Automotive Applications,2019(6):55-57(in Chinese).

[13] 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).

[14] 孙建斌,翁兴中. 军用机场沥青混凝土道面结构设计指标确定[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2005,6(1):8-10.
SUN J B, WENG X Z. Research on structure design criteria of asphalt concrete pavement for military airport[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition),2005,6(1):8-10(in Chinese).

[15] BRILL D R, PARSONS I D. Three-dimensional finite element analysis in airport pavement design[J]. International Journal of Geomechanics,2001,1(3):273-290.

[16] 杨光. 寒区机场水泥混凝土道面剩余寿命评估预测研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
YANG G. Research on evaluation and prediction of residual life of cement concrete pavement of airport in cold region[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2017(in Chinese).

http://bhxb.buaa.edu.cn

[17] TODINOV M T. Necessary and sufficient condition for additivity in the sense of the palmgren-miner rule[J]. Computational Materials Science,2001,21(1):101-110.

[18] 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).

[19] 王振辉,蔡良才,顾强康,等. 考虑荷载应力分布的机场刚性道面累积损伤优化模型[J]. 土木工程学报,2011,44(11):143-150.
WANG Z H,CAI L C,GU Q K,et al. Airport rigid pavement cumulative damage optimization model considering load stress distribution[J]. China Civil Engineering Journal,2011,44(11):143-150(in Chinese).

[20] 纪伦,张锐,徐慧宁,等. 季冻区道路结构温度场分布特性研究[J]. 中外公路,2013,33(3):57-63.
JI L,ZHANG R,XU H N,et al. Research on temperature field distribution characteristics of road structure in seasonal frozen area[J]. Journal of China and Foreign Highway,2013,33(3):57-63(in Chinese).

[21] 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 aircrafts[J]. China Civil Engineering Journal,2011,44(1):121-126(in Chinese).

[22] RISITANO A,RISITANO G. Cumulative damage evaluation in multiple cycle fatigue tests taking into account energy parameters[J]. International Journal of Fatigue,2013,48(48):214-222.

Size of cement concrete pavement slab of airport runway

ZHANG Xianmin*, LI Mengxiao, CHEN Yu, LI Changhui, XU Boqing

(School of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Chinese airports usually use cement concrete road slabs with a slab width of no more than 5 m, and existing airports in other countries use cement concrete slabs with a width more than 6 m. Small size cement concrete pavement slabs are more likely to suffer from disease than large size. In order to study the effect of pavement slab size on pavement performance, a finite element model of pavement structure was established based on the elastic layered theoretical system. By changing the size of the pavement slab, the stress changes of the pavement slab under the combined action of aircraft load and temperature gradient are studied. The internal stress change of the slab is used to analyze the influence of the plane size of the pavement slab on the service life of the pavement slab under the combined action of temperature gradient and aircraft load through an example of real airport. The results show that the internal stress of the pavement slab is greatly affected by the temperature gradient. Under the action of common aircraft load, more than 25% of the internal tensile stress of the pavement slab in summer is caused by the temperature gradient load; under the same load, the damage of different sizes of pavement slabs is different, and choosing the appropriate pavement size can significantly increase the expected service life of the cement concrete pavement.

Keywords: pavement slab size; temperature gradient; critical load; cumulative damage; fatigue life

Received: 2020-11-20; **Accepted**: 2020-12-11; **Published online**: 2020-12-15 15:59

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20201215.1557.001.html

Foundation items: Key Consulting Research Project of China Academy of Engineering (2019C1-0002); Tianjin Municipal Education Commission Scientic Research Project (2019KJ122); Scientific Research Foundation of Civil Airport Engineering Research Base of China (205016010411, 205016010413); Scientific Research Foundation of Civil Aviation University of China (2020KYQD37)

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

http://bhxb.buaa.edu.cn