

XPS 保温板压缩性对冻土跑道地基温度场的影响分析

戚春香^{1a}, 路维龙^{1a,2}, 韩卓^{1a}, 马佳荟^{1a}, 苑中源^{1b}

(1. 中国民航大学 a.交通科学与工程学院; b. 建设指挥部, 天津 300300; 2. 南京智莲森信息技术有限公司, 南京 210000)

摘要: 为了研究在飞机荷载长期作用下隔热层压缩变形对冻土跑道地基(简称道基)温度场的影响, 结合青藏高原机场跑道结构, 采用有限元方法分析了8种不同机型飞机滑行时, 隔热层处的最大应力范围, 进而基于室内模型试验, 研究了在此压力下聚苯乙烯挤塑板(XPS, extruded polystyrene)保温板压缩率对其导热性能的影响规律, 以及不同厚度XPS保温板的保温效果。在此基础上, 针对不同厚度XPS保温板, 建立机场冻土道基计算模型, 对比分析了隔热层不同压缩率对冻土道基融深的影响和跑道宽度对XPS保温板隔热性能衰减的影响。结果表明: 布置XPS保温板可明显减小道基融深, 而对应同一保温板压缩率, 跑道宽度增加会引起道基融深的增加。本研究可为中国冻土场道设计提供参考依据。

关键词: XPS保温板; 多年冻土; 跑道地基; 温度场; 压缩性

中图分类号: V351.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5590(2026)01-0060-08

Analysis of the effect of XPS insulation board compressibility on the temperature field of permafrost runway foundations

QI Chunxiang^{1a}, LU Weilong^{1a,2}, HAN Zhuo^{1a}, MA Jiahui^{1a}, YUAN Zhongyuan^{1b}

(1a. College of Transportation Science and Engineering; 1b. Construction Management Office, CAUC, Tianjin 300300, China; 2. Nanjing ZillionZen Information Technology Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: To study the influence of compression deformation of the insulation layer under long-term aircraft loading on the temperature field of permafrost runway foundation (hereinafter referred to as subgrade), and in combination with the runway structure of Qinghai-Tibet Plateau airports, the finite element method was used to analyze the maximum stress range at the insulation layer during taxiing of eight different types of aircraft. Furthermore, based on indoor model tests, the influence rule of the compression ratio of extruded polystyrene (XPS) insulation board on its thermal conductivity under this stress, as well as the thermal insulation performance of XPS insulation boards with different thicknesses, was investigated. On this basis, a computational model of airport permafrost subgrade was established for XPS insulation boards of different thicknesses. The effects of different compression ratios of the insulation layer on the thaw depth of permafrost subgrade and of runway width on the degradation of thermal insulation performance of XPS insulation boards were comparatively analyzed. The results show that the placement of XPS insulation boards can significantly reduce the thaw depth of the subgrade, and at the same compression ratio of the insulation board, an increase in runway width leads to an increase in the thaw depth of the subgrade. This study can provide a reference basis for the design of airfield pavements in permafrost regions of China.

Key words: XPS insulation board; permafrost; runway foundation; temperature field; compressibility

在寒区路基中设置隔热层可以增加路基热阻, 有效改变温度波的传递深度, 从而减小路基的融化深度(简称融深)。因此, 保温隔热技术是中国冻土区机场建设中采用的主要温控措施之一。考虑隔热效果, 公

路隔热层的埋设深度(简称埋深)在满足行车要求的前提下, 应尽量浅。尽管传至隔热层的应力不超过其允许值, 但由于隔热材料强度较小, 在长期荷载作用下, 隔热层可能会被压缩, 使其导热系数增大, 热阻减

收稿日期: 2024-04-07; 修回日期: 2024-10-16 **基金项目:** 国家自然科学基金项目(52308470); 中央高校基本科研业务费专项(3122023023)

作者简介: 戚春香(1980—), 女, 河北衡水人, 副教授, 博士, 研究方向为机场道面研究。

通讯作者简介: 苑中源(1985—), 男, 山东日照人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为道路与机场工程、市政工程。

小。尤其是寒区机场跑道,由于飞机荷载大而集中,其附加应力水平显著高于汽车和列车荷载,而其隔热层比公路、铁路埋深浅^[1-3]。因此,冻土跑道地基(简称道基)中的隔热材料被压缩的程度,其压缩后对道基温度场及隔热效果的影响是值得深入研究的问题。

目前,应用比较广泛的隔热材料有硬质聚氨酯泡沫(PU, polyurethane foam)、聚苯乙烯泡沫板(EPS, expanded polystyrene board)、聚苯乙烯挤塑板(XPS, extruded polystyrene)3种。研究表明,XPS保温板在强度、保温性能、抗老化、吸水性等方面的性能都优于其他两种材料^[4-8]。国内学者还通过试验测试和数值模拟的方法,研究了XPS保温板在冻土地基中的保温隔热性能^[9-13],然而其未考虑长期交通荷载作用下隔热层的压缩及其对隔热效果的影响。

为此,本文分析了飞机荷载作用在隔热层处产生的最大应力;并开展了不同厚度XPS保温板的压缩性能试验,分析了隔热材料导热系数随其压缩率的变化规律;基于室内试验研究了不同厚度XPS保温板的隔热性能,同时验证了基于有限元模型模拟道基温度场的有效性。在此基础上,结合青藏高原机场分析了冻土道基考虑压缩后冻土融深的变化规律,研究成果可为中国冻土区机场建设提供理论依据。

1 飞机荷载作用下隔热层应力分析

1.1 跑道结构有限元模型

采用ABAQUS软件,参照青藏高原机场的跑道结构建立有限元模型,如图1所示。该跑道模型宽度45m,两侧地面延伸60m。

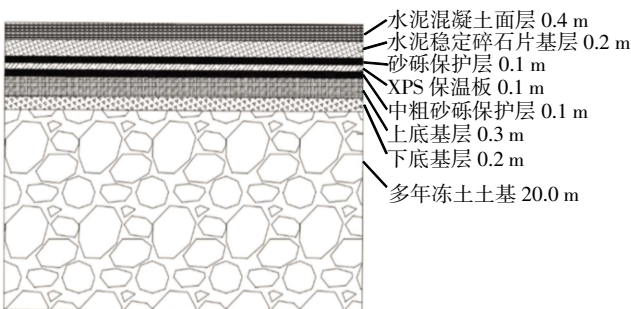


图1 跑道结构有限元模型

Fig.1 Finite element model of runway structure

本文采用C3D20R二次六面体建立三维弹性层状体系力学有限元模型,面层与基层之间相互作用采用摩擦方式^[14],且切向摩擦系数为1.5,基层与垫层、垫层与土基之间均采用绑定约束。为了确保该模型只有纵向变形,设定土基底面为固定约束,并约束模型其余

两方向的位移量为0。其各模块采用实体单元创建,道面尺寸和板块大小严格按照青藏高原机场的道面数据。其各结构层力学参数取值如表1所示,其中: h 为厚度、 ρ 为密度、 E 为弹性模量、 μ 为泊松比。

表1 跑道结构力学参数

Tab.1 Mechanical parameters of runway structure

结构层	h/m	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$	E/MPa	μ
水泥混凝土面层	0.4	2 350	36 000	0.15
水泥稳定碎石片基层	0.2	2 200	1 500	0.25
砂砾保护层	0.1	2 100	200	0.35
XPS保温板	0.1	45	15	0.37
中粗砂保护层	0.1	1 500	300	0.38
上底基层	0.3	2 100	200	0.35
下底基层	0.2	2 300	200	0.30

1.2 飞机荷载应力分析

飞机的动荷载受飞机滑行速度、机型、道面平整度、机翼产生的升力等因素影响。选取8种不同机型的飞机,以不同的滑行速度,在1、2、3、4、5 m/km 5种国际平整度指数(IRI, international roughness index)的道面上滑行,分析飞机动荷载系数

$$W' = 1 + 11.5c_0R_{IRI}\sqrt{v} - \frac{1 + 11.5R_{IRI}\sqrt{v_0}}{v_0^2} \quad (1)$$

式中: c_0 为系数^[15],取 $10^{-3}m^{-0.5}s^{-0.5}$; R_{IRI} 为国际平整度指数; v 为飞机滑行速度(m/s); v_0 为飞机离地起飞速度(m/s)。

取最大机型A380的动荷载系数,使用ABAQUS软件计算道面结构应力。当 $R_{IRI} = 5$ 时,A380飞机荷载对道面的应力云图如图2所示。提取8种不同机型飞机对隔热层处最大应力,如表2所示。同时,考虑隔热层以上道面结构的自重,其隔热层处所承受的应力范围约为80~130 kPa。

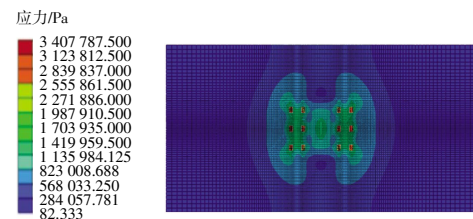


图2 A380飞机荷载对道面的应力云图($R_{IRI}=5$)

Fig.2 Stress contour plot of the pavement under A380 aircraft loading ($R_{IRI}=5$)

表2 不同机型飞机对道面隔热层处最大应力

Tab.2 Maximum stress at the pavement insulation layer induced by different aircraft types

机型	最大应力/kPa	考虑道面自重最大应力/kPa	机型	最大应力/kPa	考虑道面自重最大应力/kPa
B737-500	35	81	A321	44	90
B737-600	37	83	A300-330	68	114
A320	40	86	B747-400	83	129
B737-800	42	88	A380	85	131

2 隔热材料压缩性能试验

2.1 压缩强度试验

试验采用厚度分别为 $h_x = 3, 5, 7, 10$ cm 的 4 种 XPS 保温板,依据相关试验标准对 XPS 保温板开展压缩强度试验。每种厚度制作 3 组试件,试件尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,采用 EHC-300 型万能试验机,试验机加载速率为 $h_x/10(\text{cm} \cdot \text{min}^{-1})$ 。取 3 组试件的强度平均值作为 XPS 保温板的压缩强度,4 种不同厚度 XPS 保温板的压缩变形曲线如图 3 所示。

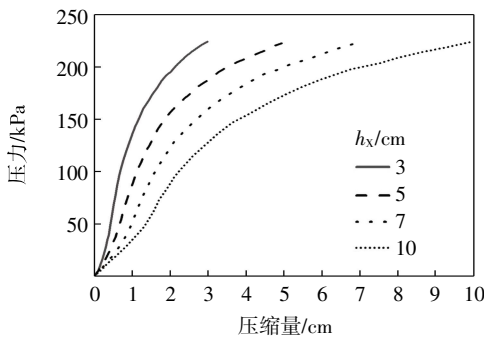


图 3 不同厚度 XPS 保温板的压缩量与压力关系曲线

Fig.3 Compressive deformation versus pressure curves for XPS insulation boards of different thicknesses

由图 3 可以看出,在相同压力下,4 种厚度 XPS 保温板的压缩率几乎相同;当压力较小时,压缩量与压力呈线性关系;随着压力的增大,当平均压缩率大于 3%时,曲线逐渐趋于非线性,说明 XPS 保温板的内部结构开始发生破坏,XPS 保温板也即将产生塑性变形。

经过压缩试验后,XPS 保温板的厚度发生明显变化,并产生了不可恢复的塑性变形,如图 4 所示。

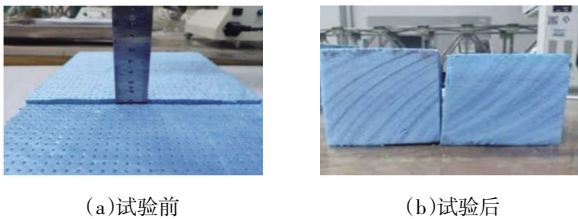


图 4 压缩试验前后试件变化

Fig.4 Changes of the specimen before and after the compression test

2.2 导热性能试验

选取同一厚度、不同批次的 XPS 保温板,制作 15 个试件,每个试件尺寸为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$,控制应力分别为 80、100、120、150、200 kPa 对试件进行压缩,分别测定压缩前后试件的压缩率及导热系数。其变化关系如图 5 所示。

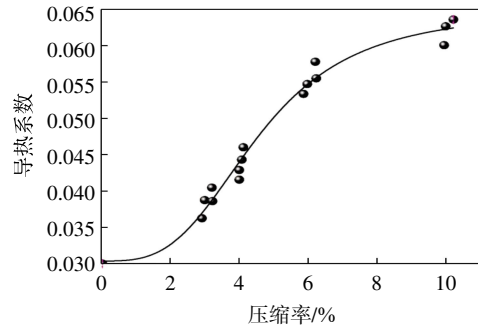


图 5 压缩率与导热系数的变化关系

Fig.5 Variation of thermal conductivity with compression ratio

由图 5 可以看出,经过压缩后,XPS 保温板的导热系数随着压缩率的增大而增大;压缩率小于 2%时,导热系数增加较缓慢,是因为此时 XPS 保温板虽产生了一定量的压缩,但其内部结构未被破坏;压缩率超过 2%后,导热系数明显增大,原因是 XPS 保温板为密闭式气泡结构,这种结构有效阻止了热传导,而压密作用破坏了其内部结构,使得导热系数增大。

3 基于 XPS 保温板保温性能试验的有限元模拟

3.1 试验工况

本次试验在配有控温系统、温度采集系统和试验模型槽的冻土实验室内开展,实验室外部尺寸为 $6.25\text{ m} \times 4.25\text{ m} \times 2.65\text{ m}$,外墙设有 10 cm 厚隔热层以确保保温效果。实验室内模型槽尺寸为 $3.8\text{ m} \times 1.9\text{ m} \times 1.1\text{ m}$ 。低温实验室及室内模型槽如图 6 所示。

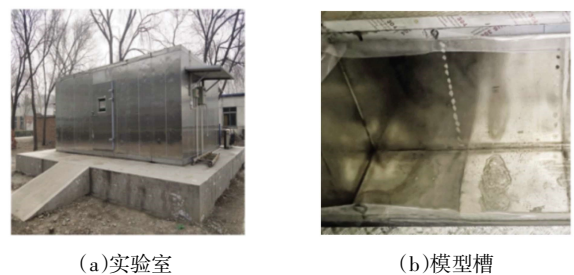


图 6 低温实验室

Fig.6 Cryogenic laboratory

该模型土为亚黏土,干密度为 1505 kg/m^3 ,含水率为 29%,冻结温度为 $-0.3\text{ }^\circ\text{C}$,融土和冻土的比热容分别为 $2827.6, 2301.5\text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$,融土和冻土的导热系数分别为 $1.23, 1.56\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ 。土样颗粒级配曲线如图 7 所示。

将实验室模型槽划分为 5 部分,分别为埋设 $h_x = 3, 5, 7, 10$ cm XPS 保温板的坑及不铺设保温板的对照坑,将每两个试验坑中间用保温隔热材料隔开,如图

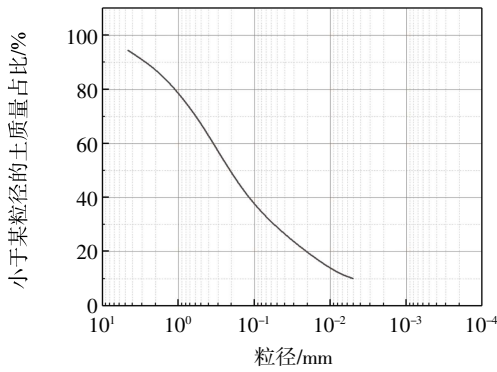


图 7 土的级配

Fig.7 Soil gradation

8 所示。每个试验坑除 XPS 保温板厚度不同外,土质、含水率、密实度及埋深等均相同。采用分层压实法填土,且每层填土厚度控制在 0.2 m;传感器的埋置是利用杆将传感器放入所需测定的深度土层中,试验传感器的分布如图 9 所示。

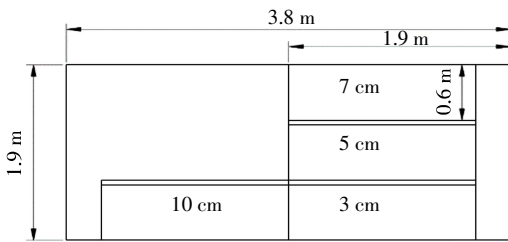


图 8 不同厚度 XPS 保温板埋设坑示意图

Fig.8 Schematic diagram of embedding pits for XPS insulation boards of different thicknesses

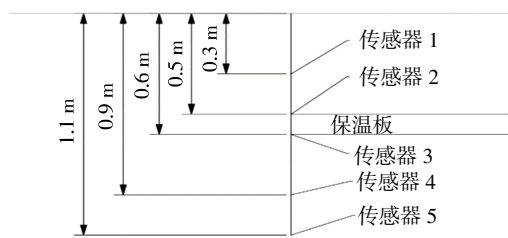


图 9 试验传感器分布

Fig.9 Distribution of test sensors

试验模拟青藏高原那曲地区的气温变化,通过国家气象科学数据中心查得,该地区 30 年的月平均气温年变化如图 10 所示。为模拟土基在冷季的降温过程,试验模拟 7—10 月的气温下降阶段。经前期试验测得,当同一温度设定时长为 1 d 时,影响深度约为 0.3 m。由于模型土深度为 1.1 m,因此,若使最上层温度足以影响下部土层温度且维持在负温状态,则同一温度的合理持续时长至少为 6 d。因此,为了能够确保试验地温控制准确,设定同一温度持续时长为 7~14 d。设定的试验控制温度和持续时间,如表 3 所示。

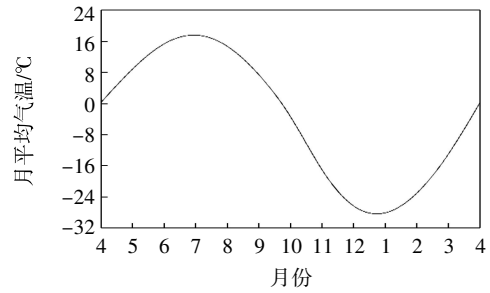


图 10 青藏高原那曲地区 30 年月平均气温年变化

Fig.10 30-year annual variation of mean monthly temperature in Naqu, on the Qinghai-Tibet Plateau

表 3 试验控制温度和持续时间

Tab.3 Controlled temperatures and durations of the test

温度/°C	时长/d	温度/°C	时长/d
16.1	3	-7.5	7
15.5	7	-10.9	7
7.9	7	-5.5	7
2.1	7	0	7
0	7	10.1	7

3.2 室内模型试验有限元模拟

3.2.1 初始条件

依照室内模型试验测得的土参数,利用 ABAQUS 软件创建三维土基水热耦合温度场模型,并采用 DC3D20 计算单元。其模型顶部土的初始温度为 17.71 °C,底部土的初始温度为 15.35 °C,且中间各层土的初始温度随模型深度的增加呈递减线性关系。

3.2.2 模型边界条件

室内模型上边界为开放条件,取测土表面温度,模型槽四周及底部均设置绝热材料,可视为绝热条件。且因模型试验位于室内,故不考虑太阳辐射,模型中通过设置对流热交换系数来实现对流换热,其中每阶段对流热交换系数由降温系统吹风风速与吹风时间决定^[6],其中风速即为室内降温系统吹风的平均风速,取 8 m/s。

3.2.3 有限元模拟与室内模型试验结果对比

该模型基于水热耦合的温度场计算模型模拟室内模型试验的降温过程^[7],提取不同厚度 XPS 保温板各深度处的土温,并与实测结果进行对比。限于篇幅,文中给出了有限元模拟与室内模型试验在 XPS 保温板 $h_x = 3, 7$ cm 时不同深度处的土温随时间的变化曲线,如图 11 所示。

由图 11 可知,有限元模拟结果和室内模型试验所得的土温随时间变化的规律曲线大体一致,说明该有限元模型可以有效模拟实际道基温度场的分布规律。

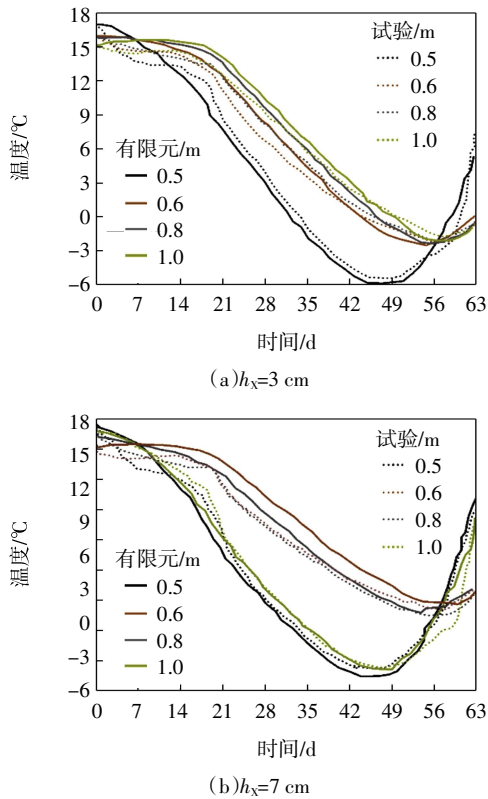


图 11 采用不同厚度 XPS 保温板的试验与有限元模型土温对比
Fig.11 Comparison of soil temperatures between test and finite element model with XPS insulation boards of different thicknesses

4 隔热层压缩对道基温度场的影响

4.1 机场冻土道基计算模型

4.1.1 跑道结构层参数

表 4、表 5 分别为道面结构层热参数和土层参数值,其中: C_u 是融化时各层比热容, C_f 是冻结时各层比热容, k_u 是融土导热系数, k_f 是冻土导热系数。参照表 1、表 4 和表 5 给出的参数^[18],考虑水热耦合效应,运用 ABAQUS 软件中的材料生热模拟 UMATHT 子程序完成等效热参数设置^[19]。

表 4 道面结构层热参数

Tab.4 Thermal parameters of the structural layers of the pavement

结构层	$C_u/(J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	$C_f/(J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	$k_u/(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	$k_f/(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$
水泥混凝土面层	879	879	1.800	1.800
水泥稳定碎石片基层	1 730	1 730	1.060	1.060
砂砾保护层	910	910	2.060	2.060
XPS 保温板	5 346	5 346	0.029	0.029
中粗砂保护层	1 010	1 010	0.580	0.580
上底基层	950	950	1.600	1.600
下底基层	950	950	1.500	1.500

表 5 土层参数

Tab.5 Parameters of soil layer

参数	数值	参数	数值
干密度 $(kg \cdot m^{-3})$	1 300	$k_u/(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	1.030
初始含水量/%	39.0	$k_f/(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	1.840
$C_u/(J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	1 775.06	经验系数 b	0.554 3
$C_f/(J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	1 280.40	—	—

4.1.2 边界条件

1) 上边界条件

跑道上边界受外界环境因素的影响最为复杂,主要包括太阳辐射、地表蒸发、气温及对流换热条件等。

a) 太阳辐射

根据青藏高原机场地区气象数据^[20],其一年中各月的太阳总辐射量及有效辐射量如表 6 所示。在建立 ABAQUS 模型时,采用 DFLUX 子程序实现太阳辐射的定义,根据相关研究,水泥混凝土道面太阳反射率为 0.24,天然地表太阳反射率为 0.29。根据气象原理,太阳净辐射表示为

$$B = Q \times \varepsilon \times (1 - A) - F \quad (2)$$

式中: Q 为太阳总辐射 $(MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$; ε 为坡面系数; A 为反射率(%); F 为有效辐射 $(MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$ 。

表 6 太阳总辐射与有效辐射

Tab.6 Total and effective radiations of solar

月份	$Q/(MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$	$F/(MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$	月份	$Q/(MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$	$F/(MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$
1	10	6.8	7	24	7.5
2	12	6.8	8	22	7.3
3	17	8.6	9	18	7.5
4	21	8.7	10	16	9.5
5	22	8.4	11	12	8.9
6	22	7.4	12	10	8.2

b) 地表蒸发

跑道模型上边界地表蒸发的蒸发耗热表示为

$$P = U \times G \quad (3)$$

式中: U 为表层蒸发量 (mm/d) ; G 为水汽化潜热 (J/mm) 。

地表蒸发与太阳辐射量相比非常小,仅为太阳辐射的 5%~10%,且当天然地面处于冻结状态时,蒸发耗热量几乎为 0,因此,在道基温度场计算时,可以把地面太阳辐射量转换的热流密度量减小 5%~10%,看作道基热流密度的边界条件。

c) 气温及对流换热条件

根据青藏高原机场地区的气温数据,在气温逐年升高的背景下,对该地区日平均气温进行单正弦拟合^[21],即

$$T(t) = -5.2 + g(t) + 11.3 \sin\left(\frac{2\pi}{36}t + \frac{5\pi}{9}\right) \quad (4)$$

式中: t 为旬序,1 旬为 10 d; $T(t)$ 为日平均气温 $(^\circ C)$; $g(t)$ 为该地年平均地温上升速率,取 $0.022 \text{ } ^\circ C/a$ 。

根据青藏高原机场地区风速数据^[22],该地区的月平均风速与变化速率如表 7 所示。在建立 ABAQUS 模型时,通过编写 FILM 子程序并填写平均风速和变化速率(取平均为 $-0.20 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$),计算出对流换热系数。此外,还需要在此子程序中定义所拟合的气温函数。

表 7 青藏高原机场的月平均风速与变化速率

Tab.7 Mean monthly wind speeds and rates of change at airports on the Qinghai-Tibet Plateau

月份	平均风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	变化速率/ ($10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)	月份	平均风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	变化速率/ ($10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)
1	5.2	-0.17	7	3.6	-0.23
2	5.3	-0.18	8	2.8	-0.21
3	6.1	-0.18	9	2.9	-0.19
4	4.2	-0.15	10	3.0	-0.18
5	3.9	-0.21	11	3.7	-0.21
6	3.6	-0.26	12	5.4	-0.23

2)其他边界条件

因为跑道模型两侧与天然地面连接且天然地面距离足够长(达 60 m),故两侧边界可设为绝热条件^[18]。根据青藏高原机场地区地质勘测资料^[23],15~50 m 深度内,地温梯度为 $0.04 \text{ }^\circ\text{C}/\text{m}$,下边界热流密度为 $0.03 \text{ W}/\text{m}^2$ 。

4.2 不考虑隔热层压缩的道基温度场

XPS 保温板厚度分别取 $h_x = 0, 3, 6 \text{ cm}$,计算道基温度场的变化规律。3 种工况下跑道运营 20 a 后暖季 9 月份的温度场云图如图 12 所示。

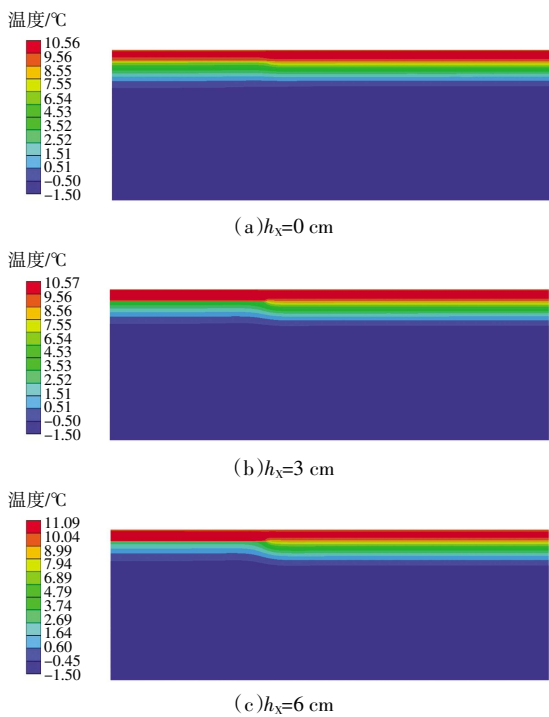


图 12 采用不同厚度 XPS 保温板的道基温度场云图

Fig.12 Temperature field contour plots of subgrade with XPS insulation boards of different thicknesses

由图 12 可以看出,铺设 XPS 保温板后,在暖季隔热效果明显,与未铺设保温板的道基相比,跑道下方的冻土上限随 XPS 保温板厚度的增加逐渐上升。

为了对比铺设不同厚度 XPS 保温板后,道基温度场随运营时间变化的规律,分别提取跑道运营 5、10、15、20 a 后对应冷季 11 月份沿深度方向的道基中央温度,得到的温度场曲线如图 13 所示。

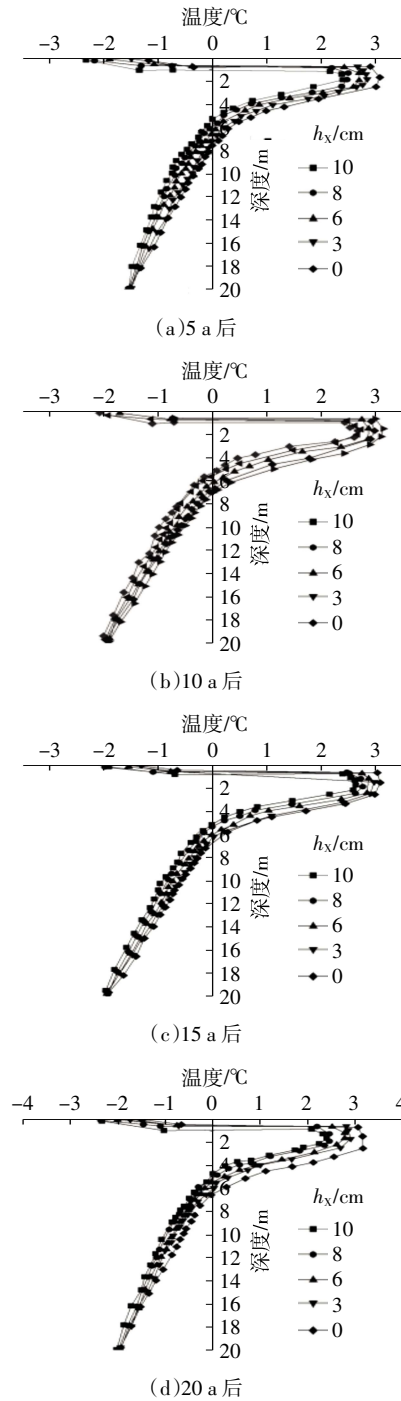


图 13 沿深度方向的道基中央各年 11 月份温度场

Fig.13 Temperature field at the subgrade central along depth direction in November of each year

由图13可知:温度在隔热层处产生了较大差异,且隔热层越厚,温差越大,冻土道基融深越小;对比跑道运营5、10、15、20 a后的温度场发现,随着跑道服役期的增加,同一厚度隔热层对应的最大道基融深逐渐增大,说明气候变暖在逐渐引起冻土退化。

4.3 隔热层不同压缩率对冻土道基融深的影响

由表2、图3和图5可知,对于B737、A320和A321机型,隔热层处(考虑道面自重)的应力范围为80~90 kPa, XPS保温板的压缩率约为2%,其导热系数增加较

小约为8%,对于A300-330、B747-400和A380机型,隔热层处(考虑道面自重)的应力从90 kPa增大到130 kPa时,XPS保温板的压缩率由2%增加到4%,其导热系数增大了约40%。

考虑在飞机长期荷载作用下,XPS保温板压缩导致其保温隔热性能衰减,依据模型分别计算不同厚度的XPS保温板在不同压缩率下,20 a内道基中部11月份对应的融深,如图14所示。

由图14可知,相同服役期对应的冻土道基融深

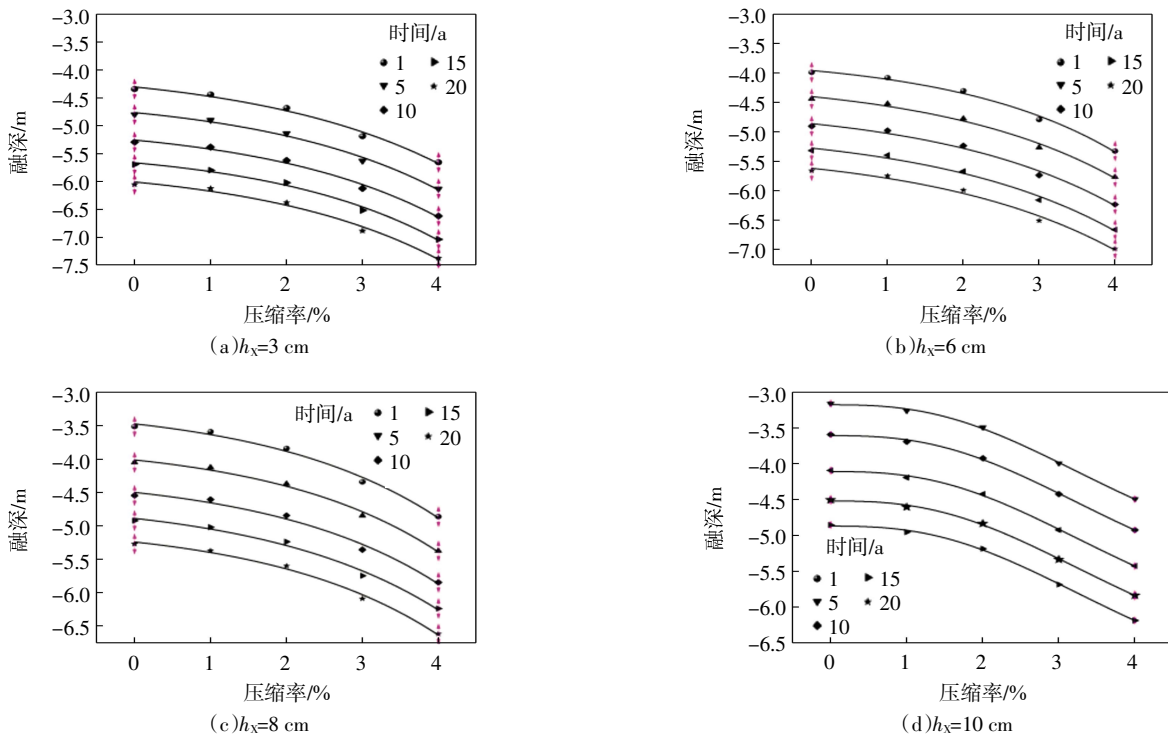


图 14 道基融深随不同厚度 XPS 保温板压缩率的变化规律

Fig.14 Subgrade thaw depth variation with compression ratio of XPS insulation boards of different thicknesses

随 XPS 保温板压缩率的增加而增大,当 XPS 保温板压缩率小于2%时,融深增加缓慢;而当保温板压缩率大于2%时,融深随着压缩率线性增长,且增长量与 XPS 保温板厚度几乎无关,保温板压缩率从2%增加到4%,对应的融深均增加了约1.2 m。此外,不同厚度的 XPS 保温板在20 a内随着运营时间的增加,前10 a融深增

加较快,10 a后融深增加逐渐减缓。

4.4 跑道宽度对 XPS 保温板隔热性能衰减的影响

考虑到跑道越宽,其吸热量越大,对道基的热状态会有一定影响,分别取45、60 m两种跑道宽度,计算20 a内采用不同厚度的XPS保温板在压缩率为4%时道基融深变化,如图15所示。

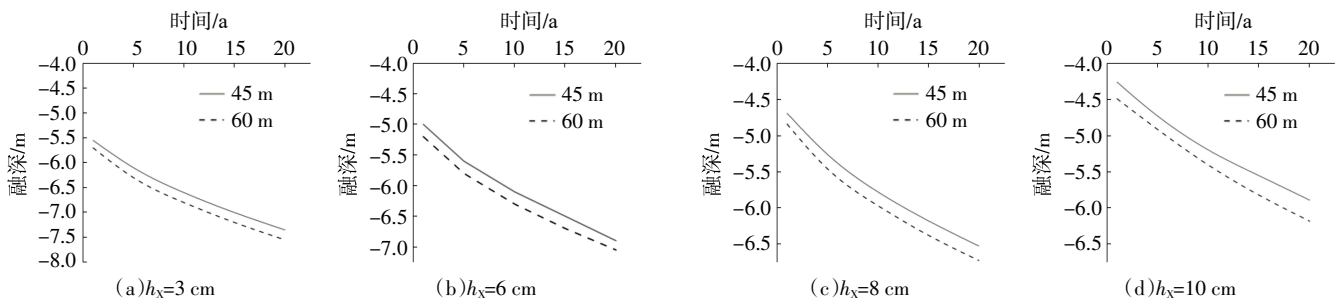


图 15 采用不同厚度 XPS 保温板的两种跑道宽度道基融深对比

Fig.15 Comparison of subgrade thaw depth between two runway widths with XPS insulation boards of different thicknesses

由图15可知,跑道宽度增加,道基融深增大,且宽度增加引起融深的变化受保温板厚度的影响较小,跑道宽度从45 m增加到60 m,道基融深增加约0.5 m。随着运营时间的增加,3、6 cm厚度的XPS保温板对应的两种跑道宽度的道基融深差几乎不变,而随着保温板厚度的增加,两种跑道宽度的道基融深差虽有所增大,但增长不大。因此,当XPS保温板压缩率一定时,跑道宽度对道基融深的影响与保温板厚度关系不大,可以不考虑。

5 结语

基于青藏高原机场跑道结构,本文采用有限元模拟和室内模型试验方法,分析了在飞机荷载长期作用下,XPS保温板压缩对冻土道基温度场的影响规律,得出以下结论。

(1)考虑道面平整度及道面自重,在8种不同机型飞机的动荷载作用下,隔热层处的最大应力范围约为80~130 kPa。且在一定荷载作用下,不同厚度XPS保温板的压缩率基本一致,其导热系数随压缩率的增大而增加,当压缩率为2%时,导热系数增加了约8%,而压缩率达到4%时,导热系数增加了约40%。

(2)通过室内模型试验与有限元模拟结果对比,验证了本文基于水热耦合模拟冻土道基温度场的有效性。在此基础上得到,XPS保温板压缩后,冻土道基融深增加,且随着XPS保温板压缩率的增加,道基融深逐渐增大,当XPS保温板压缩率为2%时,冻土道基融深增加了约0.5 m,而当压缩率为4%时,冻土道基融深增加了约1.2 m。

(3)冻土道基融深随跑道宽度的增加而增大,在一定压缩率下,跑道宽度引起的道基融深差受XPS保温板厚度影响很小。

参考文献:

- [1] 温智,盛煜,马巍,等. EPS保温板在青藏铁路中应用的适用性评价数值模拟[J]. 铁道学报, 2005, 27(3): 91-96.
- [2] 盛煜,温智,马巍. 青藏铁路北麓河试验段路基保温材料处理措施初步分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(S2): 2659-2663.
- [3] 苏谦,王迅,刘深. 青藏铁路新型路基保温材料应用试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2007, 42(4): 395-399.
- [4] 赵丽萍. XPS板在冻土路基工程中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- [5] HAN X L, MA B K, HUANG J P, et al. Large-strain performance research of XPS board under long-term load for controlling foundation differential settlement[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 501/502/503/504: 527-532.
- [6] 董元宏,朱东鹏,张会建,等. 应用于冻土路基的XPS保温板力学性能[J]. 中国公路学报, 2015, 28(12): 64-68.
- [7] 肖绪文,谢刚奎,王桂玲,等. XPS保温板抗弯能力的试验研究[J]. 施工技术, 2006, 35(4): 94-95, 99.
- [8] 汪恩良,靳婉莹,刘兴超,等. 冻融条件下XPS板吸水特性及力学性能研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(1): 47-52.
- [9] LI Q L, WEI H B, ZHOU P L, et al. Experimental and numerical research on utilizing modified silty clay and extruded polystyrene (XPS) board as the subgrade thermal insulation layer in a seasonally frozen region, NorthEast China[J]. Sustainability, 2019, 11(13): 3495.
- [10] 杨璐,孔方响,王伟. XPS板外墙外保温系统温度效应的数值模拟[J]. 沈阳工业大学学报, 2014, 36(6): 701-705.
- [11] 辛强. XPS保温板处治岛状冻土路基技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [12] TIAN Y L, LU J M, ZHANG W Y. Difference between the measured and theoretical value and their influencing factors for heat transfer coefficient of exterior wall external insulation[J]. Advanced Materials Research, 2011, 415/416/417: 1427-1430.
- [13] ZHOU Y L, WANG X, GUO C X, et al. Cooling subgrade effectiveness by L-shaped two-phase closed thermosyphons with different inclination angles and XPS insulation boards in permafrost regions[J]. Materials, 2022, 15(23): 8470.
- [14] 王金昌,朱向荣. 面层与基层间摩擦系数对应力强度因子影响的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2757-2764.
- [15] 陈洪兴,何兆益. 基于国际平整度指数IRI的路面不平整度仿真研究[J]. 公路, 2008, 53(11): 155-160.
- [16] 高亚东,刘天华,周唯斌. 新疆地区半刚性基层温度应力分析[J]. 住宅与房地产, 2016(6): 191.
- [17] 戚春香,李瑶,杨简,等. 青藏高原机场跑道多年冻土地基温度场特征[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(1): 33-47.
- [18] 汤涛,马涛,黄晓明,等. 青藏高速公路宽幅路基温度场模拟分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2015, 45(4): 799-804.
- [19] LIU C J, CHONG X L, QI C X, et al. Numerical investigation of thermal parameter characteristics of the airfield runway adherent layer in permafrost region of Northeast China[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2022, 33: 101985.
- [20] 吴佳,吴婕,闫宇平. 1961—2020年青藏高原地表风速变化及动力降尺度模拟评估[J]. 高原气象, 2022, 41(4): 963-976.
- [21] 胡泽勇,程国栋,谷良雷,等. 青藏铁路路基表面太阳总辐射和温度反演方法[J]. 地球科学进展, 2006, 21(12): 1304-1313, 1394.
- [22] 汪海年,窦明健. 青藏高原多年冻土区路基温度场数值模拟[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2006, 26(4): 11-15.
- [23] 韩卓. 保温隔热技术在多年冻土区场道地基中的应用研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2022.

(责任编辑:明月)