

体育场地中人造草坪与 天然草坪表面温度变化规律分析

肖勇强¹, 王莹莹²

(1. 西安建筑科技大学体育系体育建筑管理教研室, 陕西 西安 710055;

2. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘 要:给出了不同空气温度条件下,天然草坪与人工草坪随太阳辐射强度变化的理论计算地表温度.通过对西安地区的实际测试,得出理论计算草坪表面温度与实测值吻合较好.通过数据分析发现人造草坪表面温度受到太阳辐射的显著影响,太阳辐射强度在 $200 \text{ W/m}^2 - 800 \text{ W/m}^2$ 之间变化,人造草坪表面温度升高幅度接近 30°C ,而相应天然草坪表面温度升高幅度不超过 15°C ,并阐明随着太阳辐射强度的增加,天然草坪蒸发潜热吸收热量绝对值增加.

关键词:天然草坪;人造草坪;表面温度;空气温度

中图分类号:TU 201.5

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2013)02-0296-04

1 天然草坪与人工草坪热湿传递简化物理模型

为方便计算,将天然草坪和人造草坪的构造进行简化,如图 1 所示.深度为 15 m 的地层温度可考虑为等温层^[1],以西安为例进行计算,土壤表面年平均温度为 15.7°C ,则 15 m 以下可认为是温度为 15.7°C 的等温层.因此,体育场地天然草坪可看做是由天然草和土壤层组成的一维结构,人造草坪可看做是有人工草、橡胶层、碎石基础和土壤层组成的一维结构.

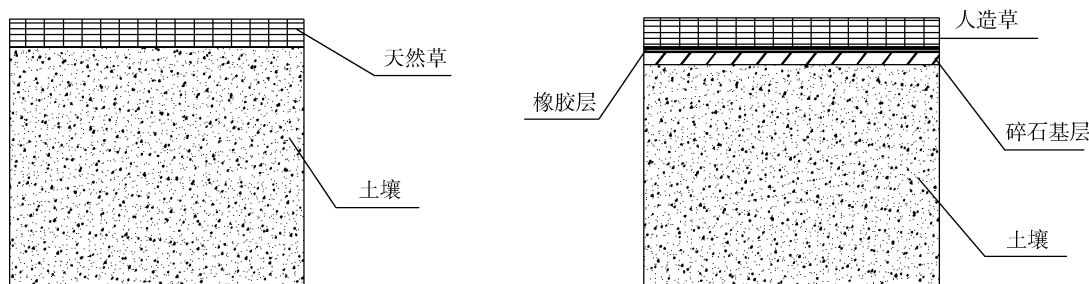


图 1 天然草坪与人工草坪的简化构造

Fig. 1 The structure of natural lawn and artificial turf

橡胶层、碎石基础层及土壤层的尺寸和物性参数如下所述:

橡胶层采用丁苯乳胶,其具有抗水隔热性能,厚度为 0.02 m,密度 $1\,240 \text{ kg/m}^3$,导热系数 $0.23 \text{ W/m} \cdot \text{K}$,水蒸气渗透系数为 $0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$.

碎石基础混凝土厚度为 0.1 m,密度为 $2\,100 \text{ kg/m}^3$,导热系数 $1.28 \text{ W/m} \cdot \text{K}$,水蒸气渗透系数 $0.000\,017\,3 \text{ g/m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa} = 4.8 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$.

将地面考虑成半无限大情况,以 24 h 为周期的日温度波动影响深度只有 1.5 m 左右,当深度大于

收稿日期:2012-08-26 修改稿日期:2013-03-28

基金项目:陕西省教育厅专项科研资助项目(08JK337)

作者简介:肖勇强(1968-),男,四川资阳人,讲师,硕士,研究方向为体育建筑场馆环境.

1.5 m 时,日温度波动由于衰减可以忽略不计.计算中可取土壤厚度 15m,密度为 1 800 kg/m³,导热系数 1.5 W/m·K,水蒸气扩散系数为 $D_v = 0.229 \times 10^{-4} (1 + T/273.15)^{1.75}$,水蒸气渗透系数为 6.1×10^{-10} kg/m²·s·Pa.

由于天然草的呼吸蒸腾作用描述复杂,因此将天然草坪层简化为具有吸放湿性能的多孔材料层;由于人造草坪层的材料是塑料,它不具有吸放湿性能,因此将其简化为一不具有吸放湿性能的多孔材料层.草层厚度均为 0.03 m,密度为 1 800 kg/m³,导热系数 2 W/m·K,天然草坪层水蒸气渗透系数为 6×10^{-9} kg/m²·s·Pa,人造草坪层水蒸气渗透系数为 0 kg/m²·s·Pa.

2 热湿传递控制方程建立

上述天然草坪与人造草坪热湿耦合迁移过程按一维处理.基于 Philip De Vries 模型^[2],按稳态进行计算,建立了全面考虑水蒸气和液态水同时传递的热湿耦合模型.

$$\text{传湿控制方程如下所示:} \quad \frac{\partial}{\partial x} \left(D_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\text{其中:} \quad D_\varphi = \delta_v P_{v, \text{sat}} \left(1 + \frac{T + 273}{T} \right) \quad (2)$$

$$D_T = \delta_v \varphi \left(\frac{\partial P_{v, \text{sat}}}{\partial T} + P_{v, \text{sat}} \frac{\ln(\varphi)}{T} \right) \quad (3)$$

式中: D_φ 是相对湿度梯度引起的传质系数, m²/s; D_T 是温度梯度引起的传质系数, m²/s·°C; T 为摄氏温度, °C; φ 为相对湿度, %; δ_v 为水蒸气渗透系数, kg/Pa·m²·s; $P_{v, \text{sat}}$ 为水蒸气饱和压力, Pa; x 为坐标, m.

D_φ 和 D_T 推导过程中涉及的饱和水蒸气压力及液态水毛细吸附压见文献[3-4].

$$\text{传热控制方程如下所示:} \quad \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_o \frac{\partial T}{\partial x} \right) - L(T) \frac{\partial J_v}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$\text{其中,水蒸气流量:} \quad J_v = - \left(\delta_v \left(\varphi \frac{\partial P_{v, \text{sat}}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} + P_{v, \text{sat}} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \right) \quad (5)$$

将方程(5)代入方程(4),得

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_o \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L(T) \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta_v \left(\varphi \frac{\partial P_{v, \text{sat}}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} + P_{v, \text{sat}} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \right) = 0 \quad (6)$$

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L(T) \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta_v P_{v, \text{sat}} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \quad (7)$$

式中: λ_o 为材料导热系数, W/m·K; $L(T)$ 为蒸发潜热, J/kg; λ_{eff} 为有效导热系数, W/m·K.

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_o + L(T) \delta_v \varphi \frac{\partial P_{v, \text{sat}}}{\partial T}$$

草坪表面 ($x = 0$) 边界条件:

$$\left(-D_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} - D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) \Big|_{x=0} = h_{m0} (\rho_{v, x=0} - \rho_{v, 0}) \quad (8)$$

$$- \left(\lambda_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x} + L(T) \delta_v P_{v, \text{sat}} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \Big|_{x=0} = h_{c0} (T_{x=0} - T_0) + L(T) h_{m0} (\rho_{v, x=0} - \rho_{v, 0}) + \alpha q_{\text{rad}} \quad (9)$$

$$\text{土壤底层 } (x = l) \text{ 边界条件:} \quad T \Big|_{x=l} = 15.7 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10)$$

$$\varphi \Big|_{x=l} = 1 \quad (11)$$

水蒸气密度 ρ_v ^[5] 利用相对湿度 φ 和温度 T 可表示:

$$\rho_v = \frac{P_v}{R_v T_k} = \frac{\varphi P_{v, \text{sat}}}{R_v (T + 273)} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (12)$$

式中: R_v 为水蒸气气体常数, J/kg·K; h_{c0} 为草坪表面对流换热系数, W/m²·K, 本计算中取 20 W/m²·K; h_{m0} 为草坪表面质交换系数, m/s, 对流质交换系数由刘易斯关系式求出, 得 0.015 8m/s;

$T_{x=0}$ 为草坪表面温度,℃; $T_{x=l}$ 为土壤底层等温层温度,℃; T_0 外部空气温度,℃; $\rho_{v, x=0}$ 为草坪表面水蒸气密度,kg/m³; $\rho_{v, 0}$ 为外部空气的水蒸气密度,kg/m³; α 为太阳辐射吸收系数,本计算中天然草坪取 0.85,人工草坪取 0.9; q_{rad} 为太阳辐射强度,W/m².

3 计算结果分析

针对不同的室外温度和太阳辐射强度,分别计算空气温度为 20℃、25℃、30℃、35℃,太阳辐射强度为 200 W/m²、300 W/m²、400 W/m²、500 W/m²、600 W/m²、700 W/m²、800 W/m²时天然草坪和人造草坪的表面温度,如图 2 所示.

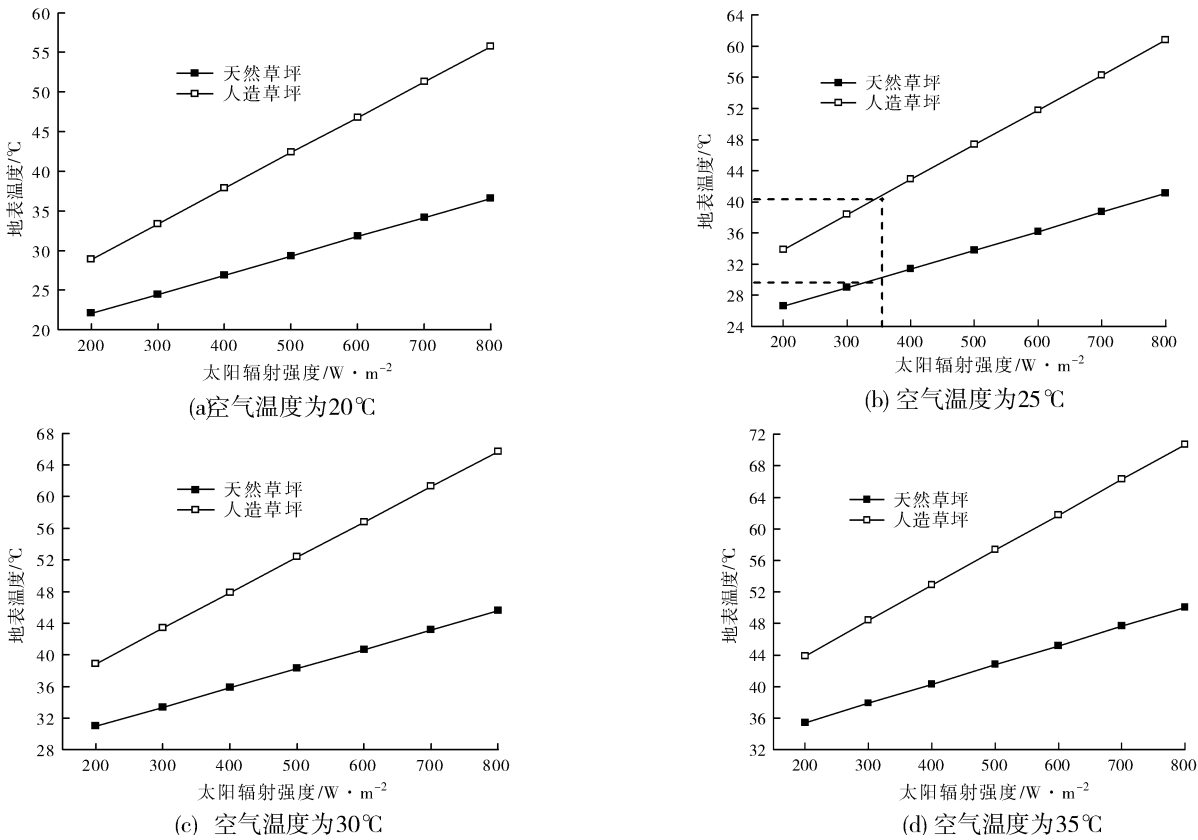


图 2 不同太阳辐射强度下天然草坪与人工草坪理论计算地表温度

Fig. 2 The calculated surface temperature of natural lawn and artificial turf under different solar radiation

为验证理论模型及计算结果的可靠性,选择铺有天然草坪和人造草坪的标准足球场进行测量,天然草坪及人造草坪球场面积相同,测量实地空气温度、草坪表面温度,对同一时间段、相同条件的两种草坪进行对比^[6].测试时间为 2011 年 5 月 10 日,测试期间天气为多云情况.实际测试数据见表 1,在上午 9:20,太阳辐射强度为 350 W/m²,草坪空气温度为 25.5℃,如图 2(b)中虚线所示,人造草坪表面温度为 40.2℃,天然草坪表面温度为 30℃,理论计算值与实际测试值基本吻合.

从计算结果分析可知,第一,天然草坪与人工草坪的表面温度所空气温度的增加而增加;第二,草坪表面温度受到太阳辐射的显著影响,太阳辐射强度在 200~800W/m²之间变化,人造草坪表面温度升高幅度接近 30℃,而相应天然草坪表面温度升

表 1 天然草坪与人工草坪实测
表面温度与空气温度的对比

Tab. 1 Surface temperature and air temperature
between natural lawn and artificial turf

时 间		人造草坪		天然草坪	
		表面温度 /℃	空气温度 /℃	表面温度 /℃	空气温度 /℃
上午	9:20	40.1	25.5	29.7	25.5
	10:20	48.3	27.6	28.7	26.4
	11:20	55.5	32.0	32.3	29.5
下午	15:00	48.7	32.8	31.5	30.3
	16:00	42.2	31.3	30.9	29.8
	17:00	38.0	30.6	26.4	29.2

高幅度不超过 15℃.

天然草坪有由于蒸发散热产生的潜热,表 2 所示为天然草坪在不同太阳辐射强度、相同温度下蒸发潜热占总吸收太阳辐射平均百分比.可以看出,当太阳辐射强度为 200 W/m²,蒸发潜热平均百分比为 19%,计算可得蒸发潜热吸收热量为 38 W/m²;当太阳辐射强度为 800 W/m²,蒸发潜热平均百分比为 8.5%,计算可得蒸发潜热吸收热量可达 68 W/m².随着太阳辐射强度的增加,蒸发潜热平均百分比逐渐降低,但蒸发潜热吸收热量绝对值增加,从而使得具有蒸发散热的天然草坪随太阳辐射强度增加的表面温度增加幅度相对较低.

表 2 天然草坪不同太阳辐射强度

下蒸发潜热占总吸收太阳辐射平均百分比

Tab. 2 Ratio of evaporation latent heat of natural lawn to solar radiation heat under different solar radiation condition

	太阳辐射强度/W·m ⁻²						
	200	300	400	500	600	700	800
蒸发潜热平均百分比/%	19	14.5	12.2	11	10	9	8.5

4 小 结

在体育场地中,天然草坪与人造草坪被大量应用,除了使用功能上的差别,两种草坪的热环境特征也有所不同.夏季天然草坪的热环境总体情况优于人造草坪,在夏季天气炎热的季节,人造草坪表面温度远远高于天然草坪,在使用可应通过洒水等方式增加蒸发散热,降低表面温度,防止对运动人员造成伤害,改善人体的热感觉.

参考文献 References

[1] 章熙民,任泽霁,梅飞鸣.传热学[M].北京:中国建筑工业出版社,2001.
ZHANG Xi-min, REN Ze-pei, MEI Fei-ming. Heat transfer[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2001.

[2] PHILIP J R, De VRIES D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients [J]. Trans Am Geophys Union, 1957,38(2):222-232.

[3] BRANCO F, TADEU A, SIMOES N. Heat conduction across double brick walls via BEM [J]. Building and Environment, 2004,39(1):51-58.

[4] 杨思文,金六一.高等工程热力学[M].北京:高等教育出版社,1988.
YANG Si-wen, JIN Liu-yi. Advanced Thermodynamics[M]. Beijing: High Education Press, 1988.

[5] 廉乐明,李力能,吴家正,等.工程热力学[M].北京:中国建筑工业出版社,2001.
LIAN Yue-ming, LI Li-neng, WU Jia-zheng, et al, Thermodynamics[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2001.

[6] 王晓昌,肖勇强,熊家晴.体育建筑环境与设备[M].北京:人民体育出版社,2010.
WANG Xiao-chang, XIAO Yong-qiang, XIONG Jia-qing. Environmentand device of sports buildings[M]. Beijing: People's Sport Press, 2010.

Research on the surface temperatures of artificial turf
and natural lawn in the sports field

XIAO Yong-qiang¹, WANG Ying-ying²

(1. School of Physical Education, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
2. School of Environment and Municipal, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Under different air temperature, the theoretical calculation surface temperature with different solar radiation of artificial turf and natural lawn in the sports field are given in this paper. The theoretical calculation surface temperature is fit to the surface temperature of actual test. Through analysis of the data, the remarkable difference of surface temperature of artificial turf with different solar radiation is found. The surface temperaturer of artificial turf reaches 30 ℃ when solar radiation changes from 200 W/m² to 800W/m². And the change of surface temperature of natural lawn is less than 15 ℃. It is clarified that the absolute values of evaporation heat increase with the stronger solar radiation.

Key words: natural lawn; artificial turf; surface temperature; air temperature

Biography: XIAO Yong-qiang, Master, Lecturer, Xi'an 710055, P. R. China, Tel:0086-29-82202005, E-mail: xiao0326@163.com