



论文

内外环境作用下主缆除湿过程传热传质特性研究

徐阳¹, 崔明¹, 魏勇¹, 倪雅¹, 杨振华², 杜高明³, 郑章靖^{1*}

1. 中国矿业大学低碳能源与动力工程学院, 徐州 221116;

2. 中国空间技术研究院, 北京 100098;

3. 江苏华通工程技术有限公司, 南京 210001

* E-mail: zhengzj@cumt.edu.cn

收稿日期: 2024-06-01; 接受日期: 2024-07-31; 网络版发表日期: 2024-12-06

国家自然科学基金面上项目(批准号: 52176215)资助

摘要 主缆除湿是目前悬索桥维护的重要内容之一, 准确预测主缆除湿过程特性是开发高效除湿系统的前提. 但主缆内部结构复杂, 且受自然环境和运行工况影响显著. 为此, 本文构建了一个更为全面的主缆除湿传热传质模型, 该模型综合考虑了内部送气参数(进气速度、进气相对湿度、进气温度、进气压力)以及外界环境因素(太阳辐射强度、环境温度、环境风速)的耦合作用对悬索桥主缆除湿过程的影响, 并利用响应面法分析各参数的敏感程度. 结果表明: 影响主缆内部积水蒸发速率的单因素中, 进气相对湿度、进气速度、环境温度和太阳辐射强度起主要作用. 讨论双因素对蒸发速率的交互作用时发现, 增加进气速度会使蒸发速率提高, 但上升趋势会逐渐趋于平缓, 并且蒸发速率的提升效果会随环境温度和进气温度升高更显著. 环境风速增加会降低蒸发速率, 但降低趋势会趋于平缓, 平缓点速度约为 6 m/s; 蒸发速率降低的幅度会随太阳辐射和环境温度增加更明显. 太阳辐射增加可以有效提升蒸发速率, 环境温度越高效果越突出; 在环境温度为 313.15 K, 太阳辐射从 0 增至 615 W/m², 蒸发速率提升 26.3%, 提升的蒸发速率是环境温度 273.15 K 提升蒸发速率的 9.7 倍. 提高主缆表面对太阳能的吸收率, 利用太阳能加速除湿; 以润扬大桥为例, 当吸收率从现有 0.2 增至 0.9 时, 各季节蒸发速率提升 11%~18%. 本文研究工作为主缆除湿系统的开发与改进提供了更为全面的理论依据和工程指导.

关键词 主缆除湿, 内外环境, 响应面法, 对流传热, 对流传质, 太阳辐射

1 引言

为了缩短通航时间成本, 我国和世界各地都在加紧建设跨江、跨河、跨海、连接岛屿和大陆的大跨度桥梁^[1]. 悬索桥具有较强的跨域能力, 相比于其他桥梁可覆盖更远的距离, 是跨河、跨海桥梁中优先选择的桥梁结构之一^[2]. 悬索桥由主缆、塔架、锚碇、鞍

座、钢箱梁^[3]等部分组成^[4]. 由于悬索桥将主缆悬挂于索塔并锚固于两岸, 主缆作为其上部结构的主要承重构件^[5], 基本无法更换. 所以主缆的耐久性对悬索桥的安全和使用寿命起着决定性作用^[6].

主缆由圆形钢丝堆砌形成的六边形蜂窝状钢丝束索股组成. 在主缆建设初期, 需要用紧缆机对预先架设主缆进行整圆压实, 主缆边缘的六边形钢丝束会被挤

引用格式: 徐阳, 崔明, 魏勇, 等. 内外环境作用下主缆除湿过程传热传质特性研究. 中国科学: 技术科学, 2024, 54: 2255–2268

Xu Y, Cui M, Wei Y, et al. Study of the heat and mass transfer characteristics of the main cable dehumidification process under internal and external environments (in Chinese). Sci Sin Tech, 2024, 54: 2255–2268, doi: 10.1360/SST-2024-0137

压分散;在主缆建设后期,随着桥面架梁工作的进行,主缆索股还会被进一步收紧压缩,索股间孔隙进一步减小。在这样多次对主缆预应力张拉后,方可进行主缆缠丝、防腐涂装等收尾工作。主缆系统和桥面系统建设整个过程通常耗时1~2年。那么,在如此长时间的建设施工过程中,难免会遇到雷雨天气,导致雨水在主缆密封前进入主缆钢丝内部。雨水与 NO_x 、 SO_2 等气体和NaCl等固体颗粒形成了电解质溶液造成电化学腐蚀^[7],增加了主缆钢丝断丝的危险性^[8]。

在主缆防护技术中,外部密封材料的更新换代可以提高耐久性以更好地隔断外界雨水的侵扰,但对于密封前主缆内部已经形成的积水环境,更需要依靠主动除湿技术才能有效地去除主缆内部的水分。然而,在主缆主动除湿过程中,由于主缆内部形成的复杂非均匀多孔结构,会对主缆内部空气流动造成影响;同时,悬索桥处于自然环境中,主缆容易受到外界环境变化的影响。正是如此,主缆受内外环境共同作用,进而导致主缆主动除湿过程传热传质复杂。

主缆主动除湿问题主要是空气流动和蒸发传质的问题。现有研究集中于主缆内空气流动阻力和主缆内温湿度分布规律。在空气流动特性方面,宋神友等人^[9]建立钢丝实体模型,研究了主缆除湿过程中钢丝尺度流动特性,以及不同堆积方式和不同通气方式对阻力的影响,并拟合出了多孔介质的阻力系数;陈策等人^[10]通过实验研究了不同流速下空气在主缆模型中的局部和沿程阻力,采用回归法建立了阻力的半经验公式,并通过润扬长江大桥的现场实验验证了其准确性;Tu等人^[11]采用多孔介质模型对主缆内空气流动特性进行简化,结合数学推导、实验研究和数值模拟,得出空气流动的半经验阻力公式;姚志安等人^[12]通过数值模拟将主缆内部多孔结构视为均一态与非均一态进行比较,验证了主缆视为非均一态多孔结构的必要性;周旭东等人^[13]通过数值模拟方法研究不同进气距离对主缆内部空气流动特性的影响,结果表明采用不等距进气方式,能够优化主缆内压力分布与速度分布。

在传热传质方面,具鑫兰等人^[14]通过数值模拟研究了太阳辐射对未被除湿主缆底部积水的影响,得到了主缆内部的温湿度分布规律;张伟^[15]通过实验研究了日照辐射作用下主缆的温度场分布,基于主缆温度场分布对主缆线性情况和受力状态进行了分析。Jia等人^[16]和魏子杰等人^[17]搭建了主缆除湿模型实验台,在

室内环境中得出了主缆除湿过程中对流传质舍伍德数的半经验公式。

综上所述,国内外诸多学者利用实验和数值模拟等手段,揭示了主缆内空气流动特性规律和传热传质特性规律。但在这些研究中往往存在局限性,要么过分聚焦于主缆内部空气流动过程的剖析,相对忽视外部环境的重要影响,要么反向偏重外部环境因素,而未能整合主缆内部空气参数对除湿的作用。实际上,主缆除湿过程是主缆内外环境协同作用下的传热传质过程,忽略进气参数变化和环境变化的综合影响会导致主缆除湿过程蒸发速率计算产生偏差,蒸发速率预测偏大会导致主缆内部除湿不完全,预测偏小会导致主缆除湿过程能源损耗加大。为此,本文构建了一个更为全面的悬索桥主缆除湿模型,该模型综合考虑了外界环境因素(太阳辐射强度、外界环境温度、外界环境风速)和内部送气参数(进气温度、进气速度、进气压力、进气相对湿度)耦合作用对主缆除湿过程的影响。研究上述各参数对除湿过程传热传质的影响规律,得到各参数对主缆除湿过程影响的敏感程度,并提出了更有效的除湿策略,为主缆除湿系统的开发与改进提供了更为全面的理论依据和工程指导。

2 物理模型

主缆由钢丝堆砌形成的六边形钢丝束紧密挤压组成,钢丝之间紧密接触。镀锌钢丝之间以及钢丝束之间错列排布,使主缆内部形成了许多微小的缝隙,孔隙率约为20%。主缆在密封施工前遭遇雨水天气会使雨水残留在主缆内部缝隙中,积水占有孔隙约为5%~8%^[18]。为了保护主缆钢丝,在桥梁架设完成后会对主缆进行密封处理,密封层与主缆钢丝接触紧密,密封层由S型缠丝和聚氨酯涂层组成,密封层内侧聚氨酯涂层厚度约2 mm,密封层中间S型缠丝厚度3 mm,密封层外侧聚氨酯涂层厚度约3 mm^[19],密封层表面多为浅白色漆面,密封层外侧表面对太阳能辐射的吸收率约为0.2,发射率约为0.8^[20]。密封完成后再利用相对湿度较低的空气进行主缆除湿,将水分从主缆中带出来,主缆除湿系统如图1所示。

主缆在实际除湿过程中处于自然环境,热质耦合传递方式如图2所示。主缆外表面会受到太阳辐射和大气对流作用的共同作用,主缆的外表面涂有密封层

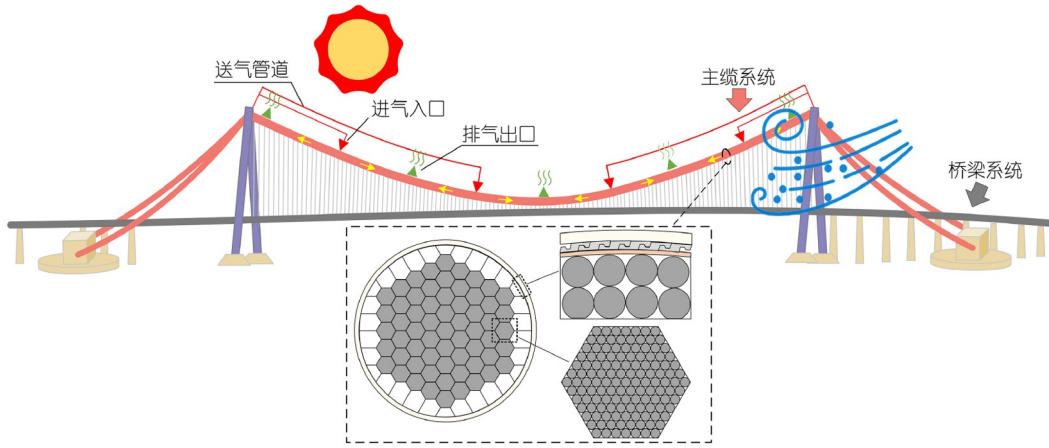


图 1 (网络版彩图)主缆除湿系统

Figure 1 (Color online) Dehumidification system for suspension bridge main cables.

防护,会阻碍热量的传递.主缆内部是由钢丝堆砌形成的特殊多孔结构,对通入的空气流动产生一定的阻力.同时通入的空气会与主缆内部钢丝对流传热,空气和积水发生对流传质,多种条件叠加构成了主缆除湿过程模型的复杂性及特殊性.

3 数学模型

为了构建内外环境作用下的主缆除湿传热传质模型,本文提出如下基本假设条件: (1) 假定太阳辐射密度均匀,入射光线垂直于主缆轴线,光照有效面积为主缆侧面的投影面积. (2) 密封层主体为聚氨酯材料,密封层热阻相对钢丝热阻较大,采用集总参数法对导热模型进行简化,即认为主缆内钢丝温度保持均匀一致. (3) 积水附着在钢丝缝隙上且不随空气流动,积水的温度 T_{water} 与主缆内部钢丝温度 T_s 保持一致;密封层紧贴主缆钢丝,钢丝温度 T_s 和密封层内侧温度 T_{wi} 相同. (4)

主缆除湿过程中空气在主缆内部的流速较低,属于层流流动. (5) 主缆内部积水的蒸发速率较低,空气质量流量受蒸发速率的影响忽略不计.在以上基本假设的前提下,控制方程由式(1)~(4)所示,控制方程中的有关变量的计算由式(5)~(14)确定.

主缆的能量守恒方程可表示为

$$\alpha I_0 A_{\text{ir}} - \varepsilon \sigma A_{\text{r}} (T_{\text{wo}}^4 - T_{\infty}^4) - h_{\text{fco}} A_{\text{fco}} (T_{\text{wo}} - T_{\infty}) + h_{\text{fci}} A_{\text{fci}} (T_{\text{fi}} - T_{\text{wi}}) - \dot{m} \Delta H = 0. \quad (1)$$

式(1)的第一项表示主缆吸收的太阳能, α 为主缆密封层表面的吸收率; I_0 为太阳辐照强度(W/m^2); A_{ir} 为太阳辐射有效面积(m^2), $A_{\text{ir}}=2rL$, r 为主缆半径(m), L 为主缆通气长度(m),密封层厚度相对主缆半径忽略不计.第二项表示主缆对外环境的辐射能, ε 为主缆密封层表面的发射率; σ 为黑体辐射系数; T_{wo} 为主缆密封层外表面温度(K); T_{∞} 为环境温度(K); A_{r} 为主缆对外辐射的面积(m^2), $A_{\text{r}}=2\pi rL$.第三项表示主缆表面与外界大气对流换热, h_{fco} 为外界对流换热系数($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$), h_{fco} 由式(5)~(9)确定; A_{fco} 为密封层外表面与外界大气的对流换热面积(m^2), $A_{\text{fco}}=A_{\text{r}}$.第四项表示空气与主缆钢丝的对流换热, h_{fci} 为主缆内部钢丝的对流的换热系数($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$), h_{fci} 由式(5)~(9)确定; A_{fci} 为空气与主缆内部钢丝对流换热的面积(m^2), $A_{\text{fci}}=2N\pi r_s L$, r_s 为钢丝半径(m); T_{fi} 为主缆内空气定性温度(K); T_{wi} 为密封层内侧表面温度(K).第五项为主缆内水分蒸发吸收的热量, $\dot{m}$ 的蒸发速率(kg/s),由式(2)确定; ΔH 为水蒸发的汽化潜热(J/kg),蒸发潜热由姚尧等人^[21]计算得到:

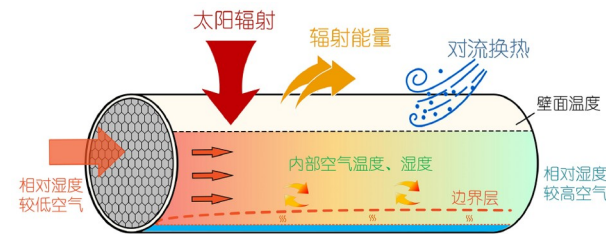


图 2 (网络版彩图)主缆除湿过程热质耦合传递

Figure 2 (Color online) Heat-mass coupling transfer during dehumidification of the main cable.

$$\Delta H = 366.609 \times 1000 \times (647.1 - T_{\text{water}})^{0.339}.$$

传质学与传热学在原理有诸多相似之处, 在对流传质过程中传递的质量也采用类似于牛顿冷却公式的形式来计算^[20], 对流传质的蒸发速率表示为 $\dot{m} = h_{mc} A_e (c_{vw} - c_{va})$. h_{mc} 为对流传质系数; A_e 为对流传质对应的有效传质面积(m^2); c_{vw} 为相变界面水侧的水蒸气摩尔浓度(mol/m^3); c_{va} 为相变界面空气侧的水蒸气摩尔浓度(mol/m^3). 由于在水面蒸发模型的相变界面上水蒸气和空气都完全是气体, 所以可以利用理想气体状态方程将式改写为

$$\dot{m} = h_m M_w A_e \left(\frac{P_{vw}}{RT_{wi}} - \frac{P_{va}}{RT_{wi}} \right), \quad (2)$$

式中 $\dot{m}$ 为蒸发速率(kg/s); h_m 为对流传质系数(m/s), h_m 由式(10)~(12)确定; M_w 为水的摩尔质量(kg/mol); P_{vw} 为相变界面水侧的水蒸气分压力(Pa), 相变界面水侧的空气相对湿度为1, $P_{vw} = P_{b,p}$; P_{va} 为相变界面空气侧的水蒸气分压力(Pa), $P_{va} = \phi P_{b,p}$, ϕ 为空气的相对湿度; $P_{b,p}$ 为主缆水蒸气的饱和蒸气压力(Pa), $P_{b,p}$ 由式(13)计算得到; R 为气体常数($\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$); 钢丝上积水的温度与钢丝温度相同 $T_{\text{water}} = T_{wi}$.

主缆密封层内外准稳态热流平衡方程为

$$\frac{T_{wo} - T_{wi}}{R} = \alpha I_0 A_{ir} - \varepsilon \sigma A_r (T_{wo}^4 - T_{\infty}^4) - h_{fco} A_{fco} (T_{wo} - T_{\infty}), \quad (3)$$

式中左侧为主缆密封层由内到外的热流量, 右侧为密封层表面与外界热交换的热流量. R 为主缆密封层的导热热阻, 热阻 R 由式(14)确定.

主缆进出口热平衡方程为

$$h_{fci} A_{fci} (T_{fi} - T_{wi}) = q_m c_p (T_f' - T_f''), \quad (4)$$

式中左侧为空气与主缆钢丝的对流换热热量, 右侧为空气内能改变量. 其中 q_m 为空气通入主缆的质量流量(kg/s); c_p 为空气的比热容($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$), $c_p = 1005 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_f' 为主缆进口空气的温度(K); T_f'' 为主缆出口空气的温度(K).

空气定性温度采用算术平均值计算:

$$T_{fi} = \frac{T_f' + T_f''}{2}, \quad T_{fo} = \frac{T_{wo} + T_{\infty}}{2}, \quad (5)$$

式中 T_{fi} 为主缆内部空气的定性温度(K), T_f' 为主缆进口空气温度(K), T_f'' 为主缆出口空气温度; T_{fo} 为主缆外部

空气的定性温度, T_{wo} 为主缆外壁面温度, T_{∞} 为环境大气温度.

空气动力黏度 $\mu(\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}))$ 公式采用Sutherland公式^[22]计算:

$$\mu_{fi} = \mu_{ref} \left(\frac{T_{fi}}{T_{ref}} \right)^{1.5} \left(\frac{T_{ref} + S}{T_{fi} + S} \right), \quad (6)$$

$$\mu_{fo} = \mu_{ref} \left(\frac{T_{fo}}{T_{ref}} \right)^{1.5} \left(\frac{T_{ref} + S}{T_{fo} + S} \right),$$

式中 μ_{fi} 为主缆内部空气的动力黏度, μ_{fo} 为主缆外部空气的动力黏度. T_{ref} 和 μ_{ref} 为参考温度和参考动力黏度, S 为萨瑟兰温度. 本式中 $T_{ref} = 273.15 \text{ K}$, $\mu_{ref} = 1.72 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$, $S = 110.4 \text{ K}$.

空气密度 $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$ 采用理想气体状态方程计算:

$$\rho_{fi} = \rho_{ref} \left(\frac{P_{fi}}{P_{ref}} \right) \left(\frac{T_{ref}}{T_{fi}} \right), \quad (7)$$

$$\rho_{fo} = \rho_{ref} \left(\frac{P_{fo}}{P_{ref}} \right) \left(\frac{T_{ref}}{T_{fo}} \right),$$

式中 ρ_{fi} 为主缆内部空气密度, ρ_{fo} 为主缆外部空气密度. ρ_{ref} 和 P_{ref} 为参考温度下的参考密度和参考压力, 本式中 $\rho_{ref} = 1.293 \text{ kg}/\text{m}^3$, $P_{ref} = 101000 \text{ Pa}$. P_{fi} 为主缆内部空气压力(Pa), $P_{fi} = [P + (P - \Delta P)]/2$, P 为主缆进气压力, ΔP 为内部空气沿程流动压力损失, 由式(13)确定. P_{fo} 为主缆外部空气压力(Pa), P_{fo} 取值为标准大气压.

空气经过主缆的雷诺数 Re :

$$Re_i = \frac{v_i d_e}{\nu_i} = \frac{v_i d_e \rho_i}{\mu_i}, \quad Re_o = \frac{v_o d}{\nu_o} = \frac{v_o d \rho_o}{\mu_o}, \quad (8)$$

式中 Re_i 为主缆内部空气流动的雷诺数; v_i 为空气在主缆缝隙中的真实流速, $v_i = u_i/[p(1-e)]$, u_i 为空气进入主缆之前截面上的表观流速(m/s), p 为主缆内部的孔隙率; e 为主缆内积水所占孔隙的占比. 当计算主缆内部空气流动的雷诺数 Re_i 时, 特征长度为主缆截面的当量直径 $d_e(\text{m})$, $d_e = 4s/c$, s 为主缆内的流通面积(m^2), c 为总湿周长度(m). Re_o 为主缆外部环境空气横掠主缆外表面的雷诺数; v_o 为外部空气横掠主缆的风速(m/s). 当计算主缆外部的雷诺数 Re_o 时, 特征长度为主缆直径 $d(\text{m})$.

空气的对流换热系数 h :

$$h_{fci} = \frac{Nu_i \lambda_i}{d_e}, \quad h_{fco} = \frac{Nu_o \lambda_o}{d}, \quad (9)$$

式中 h_{fci} 为主缆内部空气与主缆内部钢丝表面的对流换热系数; 对于主缆内部对流换热, 采用Sieder-Tate公式^[20]计算通气长度 L 的努塞尔数 Nu_i , $Nu_i=1.86[Re_i Pr/(L/d_e)]^{1/3}(\eta_i/\eta_w)^{0.14}$, 此公式的定性温度为内部空气的平均温度 T_{fi} (但 η_w 按壁温 T_{wi} 计算), 特征长度为当量直径 d_e , Pr 定义为常数, $Pr=0.699$. h_{fco} 为主缆环境大气与主缆外表面的对流换热系数, 对于主缆外部对流换热, 当 $4000 < Re_o < 40000$ 时, $Nu_o=0.193 Re_o^{0.618} Pr^{1/3}$; 当 $40000 < Re_o < 400000$ 时, $Nu_o=0.0266 Re_o^{0.805} Pr^{1/3}$, 特征长度为主缆直径 d . λ 为空气的导热系数, 空气取为常数 $\lambda=0.025 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

主缆内部空气掠过水面的对流传质系数 h_m :

$$h_m = \frac{ShD}{d_e}, \quad (10)$$

式中 D 为空气与水两相的扩散系数(m^2/s), 由式(11)计算得出. 本文采用魏子杰^[17]的半经验公式计算对流传质舍伍德数 $\bar{Sh}=0.013 Re_i^{0.23} Sc_i^{3.83}$, 式中施密特数 $Sc_i=v_i/D$. v_i 为主缆内空气的运动黏度(m^2/s), $v_i=\mu_i/\rho_i$; 使用此半经验公式计算传质系数 h_m 时, 对应的传质面积 $S=2bN\pi r_s L$, b 为对流传质面积修正系数 $b=0.0012$; N 为主缆的钢丝个数; r_s 为钢丝半径; L 为主缆通气长度.

扩散系数 D 用Fuller-Schettler-Giddings公式^[23]:

$$D_{w-a} = \frac{101 T_{\text{fi}}^{1.75} \left(\frac{1}{Mr_w} + \frac{1}{Mr_a} \right)^{0.5}}{10000 P_{\text{fi}} \left[\left(\sum V_w \right)^{1/3} + \left(\sum V_a \right)^{1/3} \right]^2}, \quad (11)$$

式中主缆内部流体温度为主缆内部空气温度 $T_{\text{fi}}(\text{K})$; 主缆内部流体系统压力为主缆内部空气压力 P_{fi} ; Mr 为扩散过程中组元的分子量; $\sum V$ 为分子扩散容积, w 和 a 表示水相和空气相. 水分子量 $Mr_w=18$, 空气分子量 $Mr_a=29$; 水分子扩散容积 $\sum V_w=12.7$, 空气的分子扩散容积 $\sum V_a=20.1$.

空气在主缆内部中复杂的孔隙结构流动存在沿程压力损失, 本文采用陈策^[10]的半经验公式:

$$\Delta P = 0.094 \frac{L}{d_e} \frac{\rho_i}{2} u_i^{0.485}, \quad (12)$$

式中 L 为空气在主缆中通气的长度; d_e 为主缆的当量直径; ρ_i 为主缆内部的空气密度; u_i 空气入口的表观流速, 适用条件: 空气入口表观流速在 $0.02 \sim 0.10 \text{ m/s}$, 主缆直

径在 $0.2 \sim 1 \text{ m}$.

主缆内部积水的饱和蒸气压力 $P_{b,p}$ 采用Goff-Gratch公式^[24]计算:

$$\begin{aligned} \log_{10}(0.01 P_{b,p}) = & 0.78614 + 10.79574 \left(1 - \frac{273.16}{T_{\text{wi}}} \right) \\ & - 5.028 \log_{10} \left(\frac{T_{\text{wi}}}{273.16} \right) \\ & + 1.50475 \times 10^{-4} \left(1 - 10^{-8.2969 \left(\frac{T_{\text{wi}}}{273.16} - 1 \right)} \right) \\ & + 0.42873 \times 10^{-3} \left(10^{4.76955 \left(1 - \frac{273.16}{T_{\text{wi}}} \right)} - 1 \right). \end{aligned} \quad (13)$$

主缆密封层的传热热阻:

$$R = \frac{\ln \frac{r_{\text{wi}} + \delta_1}{r_{\text{wi}}}}{2\pi L \lambda_p} + \frac{\ln \frac{r_{\text{wi}} + \delta_1 + \delta_2}{r_{\text{wi}} + \delta_1}}{2\pi L \lambda_s} + \frac{\ln \frac{r_{\text{wi}} + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3}{r_{\text{wi}} + \delta_1 + \delta_2}}{2\pi L \lambda_p}, \quad (14)$$

式中 R 为主缆密封层的导热热阻; r_{wi} 为内部裸主缆的半径(m); δ_1 为内部第一层聚氨酯厚度, $\delta_1=2 \text{ mm}$; δ_2 为第二层S形钢丝的厚度, $\delta_2=3 \text{ mm}$; δ_3 第三层聚氨酯的厚度, $\delta_3=3 \text{ mm}$; λ_p 为聚氨酯材料的导热系数, $\lambda_p=0.25 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$; λ_s 为S形钢丝^[15]的导热系数, $\lambda_s=50 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$.

4 数值方法及模型验证

4.1 数值方法

本文建立了自然环境中更为全面的悬索桥主缆除湿过程传热传质模型. 该模型综合考虑了外界环境因素和内部进气参数对悬索桥主缆除湿过程的影响, 外界环境包括太阳辐射强度、环境温度、环境风速; 内部进气参数包括除湿过程的进气速度、进气相对湿度、进气温度和进气压力. 联合控制方程式(1)~(4), 根据温度、压力、速度耦合关系, 采用迭代计算的数值解法, 求解主缆密封层内壁温度 T_{wi} 、主缆密封层外壁温度 T_{wo} 、主缆内部空气温度 T_{fi} 和主缆内部积水的蒸发速率 $\dot{m}$ 求解流程如图3所示.

4.2 模型验证

为了验证模型的准确性, 通过计算悬索桥主缆除湿时间对模型进行验证. 除湿时间 τ 计算公式如下:

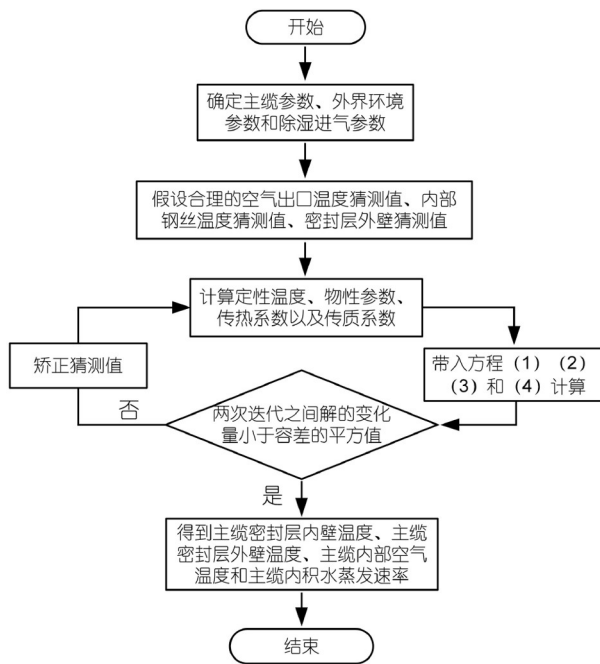


图 3 求解流程图
Figure 3 Solution flowchart.

$$\tau = \frac{m}{\dot{m}}, \quad (15)$$

式中 m (kg)为主缆内部积水的存水量; $\dot{m}$ (kg/s)为主缆内部积水的蒸发速率。

选取润扬长江大桥边跨(编号1)和中跨(编号2)两部分主缆除湿工况进行验证。润扬长江大桥呈南北布置, 主缆参数^[25]、除湿参数以及气候参数如表1和2

表 1 润扬长江大桥主缆参数

Table 1 Main cable data of Runyang Changjiang River Suspension Bridge

编号	钢丝数	钢丝直径(mm)	孔隙率	送气长度(m)	表面吸收率	表面发射率	存水率
1	23368	5.3	20%	125	0.2	0.8	6.3%
2	23368	5.3	20%	190	0.2	0.8	6.8%

表 2 润扬长江大桥除湿参数和平均气候参数

Table 2 Dehumidification data and local climatic data of Runyang Changjiang River Suspension Bridge

编号	辐射强度 ^{a)} (W/m ²)	环境温度 ^{b)} (°C)	环境风速 ^{c)} (m/s)	进气速度(m/s)	进气相对湿度	进气温度(°C)	进气压力(Pa)
1	175	15.7	3.5	0.02	0.35	20	1100
2	175	15.7	3.5	0.04	0.35	20	1690

a) 资环数据网. 2023年扬州市太阳辐射强度1~12月各月均值. <http://www.maps4gis.com/a/radiation/2296-gis-5.html>
b) 国家气象数据中心. 1981~2010年扬州市月平均气温和降水. <https://data.cma.cn/forecast/index.html>
c) 江苏天气. 润扬长江公路大桥景区历史气温统计(2023年1~12月份). <https://www.njgxjh.com/zhenjiang/jdhs25396.html>

所示。

将主缆参数、除湿参数以及环境参数代入上述模型, 该工况下第一段主缆积水量为1012.94 kg, 对应的除湿时间为357天; 第二段主缆积水量为1661.87 kg, 对应的除湿天数为327天。在工程实践中悬索桥主缆除湿时间约为1年^[25,26], 认为主缆的有效除湿时间约为360天, 对比误差均小于10%, 模型误差在允许范围内。

5 结果与讨论

5.1 响应面分析

由于主缆除湿过程内外环境影响因素众多, 为了分析各参数对主缆除湿过程影响的敏感程度, 本文采用响应面法对外部环境参数和内部送气参数进行分析。主缆参数与3.2节模型验证中编号2主缆相同, 送气长度设计为160 m。根据响应面法设计了7因素3水平实验, 实验水平如表3所示。

对实验结果进行多元回归模型分析拟合, 得到蒸发速率与太阳辐射强度、外界环境温度、外界环境风速、进气温度、进气速度、进气压力、进气相对湿度的响应面模型。响应面模型公式如附录式(A1)所示, 响应面模型的显著性结果见附表A1。附表A1中拟合模型的 P 值 <0.0001 , 表明该回归方程模型极显著, 能较好地预测主缆内部蒸发速率。相关系数 $R^2=0.9963$ 表示该回归方程拟合程度达到满意, 二者一致性较好, 模型拟合良好。但由于式(A1)较为繁琐, 为了便于应用, 对式

表 3 响应面实验的因素与水平

Table 3 Factors and levels of response surface experiments

影响因素 (单位)	代码	水平		
		-1	0	1
辐射强度 (W/m ²)	A	0	307.5	615
环境温度 (K)	B	273.15	293.15	313.15
环境风速 (m/s)	C	2	5	8
进气速度 (m/s)	D	0.02	0.06	0.1
进气相对湿度	E	0.1	0.25	0.4
进气温度 (K)	F	293.15	313.15	333.15
进气压力 (Pa)	G	102000	103000	104000

(A1)进行了适当精简, 精简过程中去除了多项式数量级较小且对模型交互作用影响不显著的项, 得到式(16), 二者计算结果差异小于5%.

$$\begin{aligned} \ln(\dot{m}) = & -54.21873 + 1.395 \times 10^{-3} A + 0.205557B \\ & -0.101716 C + 10.10299 D - 0.947071E \\ & + 0.002876 F + 0.00007 G - 2.12 \times 10^{-6} AB \\ & - 6.40 \times 10^{-5} AC - 1.09 \times 10^{-4} AD + 3.35 \times 10^{-4} BC \\ & - 1.6958 \times 10^{-2} BD + 1.74 \times 10^{-4} BE \\ & - 1.00 \times 10^{-5} BF - 4.40 \times 10^{-9} BG - 1.03 \times 10^{-4} CF \\ & + 1.43 \times 10^{-2} DF + 1.73 \times 10^{-6} DG + 1.19 \times 10^{-7} EG \\ & - 1.14 \times 10^{-8} A^2 - 2.39 \times 10^{-4} B^2 + 3.39 \times 10^{-3} C^2 \\ & - 41.29954 D^2 - 0.927832 E^2 + 1.19 \times 10^{-6} F^2 \\ & - 2.00 \times 10^{-10} G^2. \end{aligned} \quad (16)$$

附表A1中单因素A, B, C, D, E, F, G的 P 值 <0.0001 , 表现为各单因素对蒸发速率影响作用极显著; 通过比较 F 值大小得到主缆内外各因素对蒸发速率影响强弱, 综合排序为: 环境温度 $>$ 相对湿度 $>$ 进气速度 $>$ 太阳辐射强度 $>$ 环境风速 $>$ 进气压力 $>$ 进气温度; 若按主缆内部、外部分别排序, 内部因素中: 进气相对湿度 $>$ 进气速度 $>$ 进气压力 $>$ 进气温度; 外界因素中: 环境温度 $>$ 太阳辐射强度 $>$ 环境风速.

附表A1中交互项AC的 P 值 <0.0001 , 表现为对蒸发速率作用极显著, 交互项AB, BC, BD, DF的 P 值 <0.05 , 表现为对蒸发速率作用较显著. 显著交互项中包含A, B, C, D和F, 但不包含E和G. 进气相对湿度E和进气压力G只通过传质去影响蒸发速率, 难以产生显著交互作用.

5.2 显著交互项对蒸发速率的影响分析

显著交互项表明其所包含的两个因素对蒸发速率产生的影响不是简单的线性叠加, 而是存在一种更为复杂的关系. 通过分析显著交互项所包含的因素对蒸发速率的影响规律, 清晰的知道控制哪些因素更值得, 才有利于合理开发更高效的除湿系统. 因此, 本节针对显著交互项DB, FD, CA, BC, AB展开分析. 并且规定, 在讨论显著交互项所包含的因素对主缆内部积水蒸发速率的影响时, 其他因素处于中心水平.

5.2.1 内部进气参数与其交互参数分析

内部进气参数包含进气速度(D)和进气温度(F). 图4显示了蒸发速率随进气速度(D)和其交互项环境温度(B)的变化趋势. 由图4可以看出, 当环境温度为313.15 K时, 进气速度由0.02 m/s增加到0.04 m/s, 提升最显著, 约为14.6%; 之后随着进气速度继续增加, 蒸发速率的增量逐渐减少, 最后速度由0.08 m/s增加到0.1 m/s, 所提升的蒸发速率只有3.8%. 可见, 增加进气速度可以提高主缆内部积水的蒸发速率, 但随着进气速度不断增加, 蒸发速率上升趋势会逐渐趋于平缓, 这一趋势在各环境温度下均保持一致. 趋势变缓的原因是传质系数 h_m 随流速增加上升趋势逐渐变缓. 结合式(2)可知蒸发速率 $\dot{m}$ 质系数 h_m 是线性关系, 所以随着入口进气速度不断增加, 相对应的蒸发速率上升趋势会逐渐平缓.

此外, 图4还展示了进气速度(D)和环境温度(B)交互作用对蒸发速率的影响. 从图4中可以得到, 环境温度为273.15 K时, 进气速度从0.02 m/s增加到0.1 m/s, 蒸发速率升高 9.64×10^{-6} kg/s; 环境温度为313.15 K时, 进气速度从0.02 m/s增加到0.1 m/s, 蒸发速率升高 9.9×10^{-5} kg/s. 将两种情况对比发现, 环境温度升高, 增加进气速度对蒸发速率的提升效果更显著. 这是因为当其他因素处于中心水平时, 环境温度升高和进气速度增加都会使主缆内部积水温度升高 T_{wi} , 积水的饱和蒸气压 $P_{b,p}$ 随温度变化 T_{wi} 的斜率增大. 同时, 入口进气速度增加, 传质系数 h_m 增大. 所以入口进气速度增加对蒸发速率的提升效果, 会随环境温度升高更显著.

图5展示了主缆内部积水的蒸发速率随进气温度(F)和其交互项进气速度(D)的变化趋势. 由图5可以看出, 进气温度升高可以提高主缆内部积水的蒸发速率.

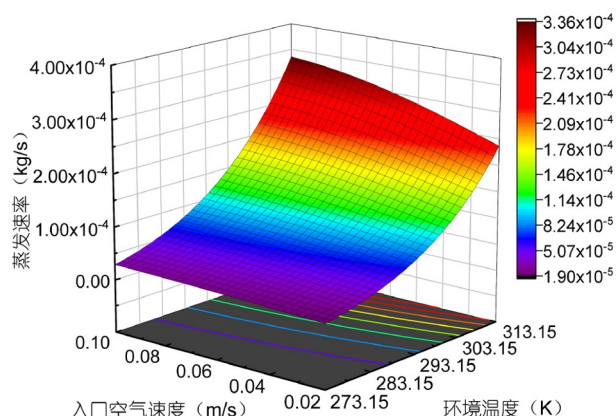


图4 (网络版彩图)进气速度与环境温度对主缆内积水蒸发速率的影响

Figure 4 (Color online) The effect of air inlet velocity and environmental temperature on the rate of water evaporation from the inside of the main cable.

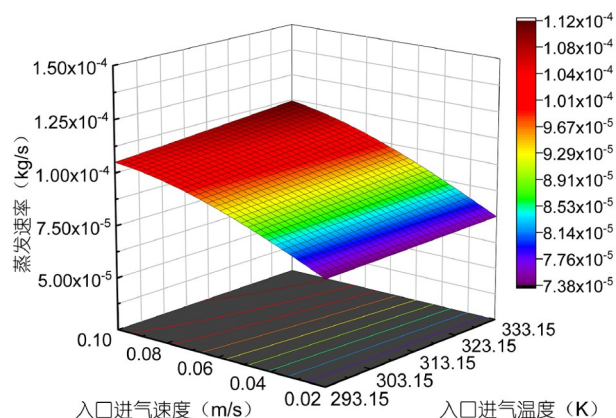


图5 (网络版彩图)进气温度与进气速度对主缆内积水蒸发速率的影响

Figure 5 (Color online) The effect of air inlet temperature and inlet velocity on the rate of water evaporation from the inside of the main cable.

这是因为进气温度升高, 通过对流换热会使主缆温度和主缆内部积水温度升高, 积水的饱和蒸气压 $P_{b,p}$ 增大, 蒸发速率也随之增大。

并且, 图5展示了进气温度(F)和进气速度(D)交互作用对蒸发速率的影响。从图5中还可以得到, 进气速度为0.02 m/s时, 进气温度从293.15 K增加到333.15 K, 蒸发速率升高 1.62×10^{-5} kg/s; 进气速度为0.1 m/s时, 进气温度从293.15 K增加到333.15 K, 蒸发速率升高 2.27×10^{-5} kg/s。将两种情况对比发现, 进气速度增加, 会使进气温度对蒸发速率的影响更显著。这是因为进

气温度升高和进气速度增加, 会使主缆内部积水的饱和蒸气压 $P_{b,p}$ 和传质系数 h_m 增大。所以进气温度增加对蒸发速率的提升效果, 会随入口进气速度增加效果越为显著。那么同样, 进气速度(D)增加对蒸发速率的提升效果, 也会随进气温度(F)升高效果更为显著。综合图4和5分析结果可以发现, 增加进气速度对蒸发速率的提升效果会随环境温度和进气温度升高更显著。

综上所述, 通过增加进气速度和提升进气温度均可以提升除湿效率。但是增加进气速度会导致运行风机功耗增加且对主缆密封材料提出更高要求; 而提升进气温度也需要消耗能量。因此, 内部进气参数的选择需要综合考虑经济性和主缆密封安全。

5.2.2 外部环境参数与其交互参数分析

外部环境参数包含环境风速(C)、环境温度(B)和太阳辐射强度(A)。图6显示了蒸发速率随环境风速(C)和其交互项太阳辐射强度(A)的变化趋势。由图6可以看出, 辐射强度为 307.5 W/m^2 时, 环境风速从2 m/s增加到8 m/s, 风速每增加1 m/s, 对应蒸发速率减少的差值为 4.06×10^{-6} kg/s, 3.24×10^{-6} kg/s, 2.49×10^{-6} kg/s, 1.78×10^{-6} kg/s, 1.12×10^{-6} kg/s, 4.79×10^{-7} kg/s。可见环境风速不断增加, 蒸发速率降低趋势逐渐平缓, 其中6~7 m/s和7~8 m/s下降幅度已不足2~3 m/s下降幅度的30%, 可将6 m/s视作为平缓点速度, 这一趋势在图6所示的各太阳辐射强度下均保持一致。蒸发速率降低趋势逐渐平缓, 是因为在除环境风速外其他条件均保持固定情况下, 环境风速增加, 散热作用使主缆内部积水温度降低, 积水的饱和蒸气压减小。当积水温度降低到与环境温度接近时, 即使风速继续增加, 积水温度也难以降低, 积水的饱和蒸气压不再发生变化, 蒸发速率不再改变。

此外, 图6展示了环境风速(C)和太阳辐射强度(A)交互作用对蒸发速率的影响。辐射强度为0时, 环境风速从2 m/s到8 m/s, 蒸发速率减少 1.26×10^{-6} kg/s; 辐射强度为 615 W/m^2 时, 环境风速从2 m/s到8 m/s, 蒸发速率减少 2.8×10^{-5} kg/s。可见, 辐射强度越高, 环境风速增加导致蒸发速率下降越剧烈。这是因为在太阳辐射加热作用下, 主缆温度和主缆积水温度升高, 温度升高后积水的饱和蒸气压随温度变化的斜率增大。所以环境风速对蒸发速率的影响, 会在太阳辐射强度高时更显著。

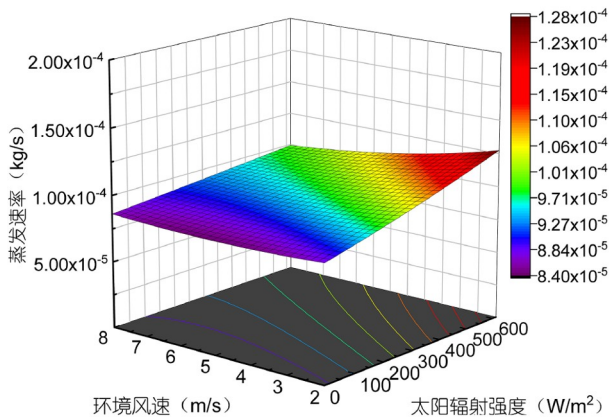


图6 (网络版彩图)环境风速和辐射强度对主缆内积水蒸发速率的影响

Figure 6 (Color online) The effect of environmental wind velocity and solar radiation intensity on the rate of water evaporation from the inside of the main cable.

图7显示蒸发速率随环境温度(B)和其交互项环境风速(C)的变化趋势。由图7可以看出, 环境温度升高可以显著提高主缆内部积水的蒸发速率。原因是主缆温度和主缆内部积水温度主要受环境温度影响。环境温度升高, 主缆内部积水温度升高, 积水的饱和蒸气压增大, 由式(2)可知, 蒸发速率增大。

此外, 图7展示了环境温度(B)和环境风速(C)交互作用对蒸发速率的影响。从图7中可以得到, 环境风速为2 m/s时, 环境温度从273.15 K增加到313.15 K, 蒸发速率增加 2.97×10^{-6} kg/s; 环境风速为8 m/s时, 环境温度从273.15 K增加到313.15 K, 蒸发速率增加 2.72×10^{-6} kg/s; 可见, 当环境风速增大, 由环境温度上升对蒸发速率的提升效果会被略微减弱。这是因为环境升温, 主缆内部积水升温, 积水温度高时饱和蒸气压随温度变化更敏感。若此时环境风速增加, 增强的散热作用导致积水温度降低, 积水饱和蒸气压下降会相对更明显。当然, 在环境温度越高的情况下, 环境风速增大对蒸发速率抑制效果会相对更为显著。综合图6和7的结果可以发现, 环境风速增加对降低蒸发速率的影响幅度, 会随辐射强度和环境温度增加更显著。

图8给出了蒸发速率随太阳辐射强度(A)和环境温度(B)的变化趋势。由图8可以看出, 随着太阳辐射强度增加, 蒸发速率提升。这是因为太阳能对主缆表面起加热作用。太阳辐射增加, 导致主缆温度和主缆内部积水的温度升高, 温度升高会使得积水的饱和蒸气压增大, 蒸发速率升高。

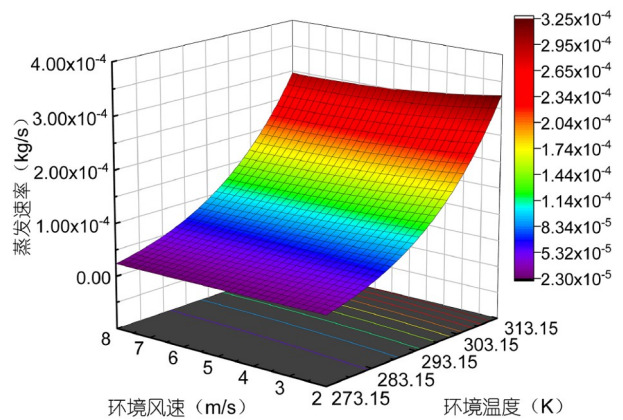


图7 (网络版彩图)环境温度和风速对主缆内积水蒸发速率的影响

Figure 7 (Color online) The effect of environmental temperature and environmental wind velocity on the rate of water evaporation from the inside of the main cab.

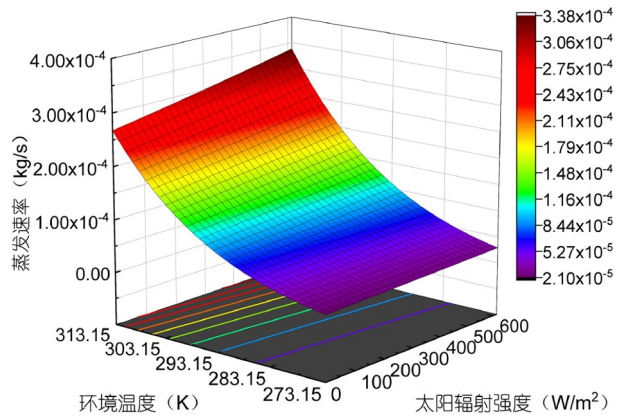


图8 (网络版彩图)辐射强度和环境温度对主缆内积水蒸发速率的影响

Figure 8 (Color online) The effect of solar radiation intensity and environmental temperature on the rate of water evaporation from the inside of the main cable.

此外, 从图8还展示了太阳辐射强度(A)和环境温度(B)交互作用对蒸发速率的影响。环境温度为313.15 K时, 太阳辐射强度从0 W/m²增加到615 W/m², 蒸发速率增加 7.06×10^{-5} kg/s, 提升约为26.3%; 对比环境温度为273.15 K提升的蒸发速率, 环境温度313.15 K提升的蒸发速率约是其9.7倍。可见, 环境温度越高, 太阳辐射对蒸发速率的提升效果越突出。这是因为环境温度升高, 主缆积水温度随之升高, 由式(13)可知, 积水饱和蒸气压随温度升高斜率增大。太阳辐射在环境温度基础上, 进一步加热使积水温度上升, 积水饱和蒸气压随之显著提升。因此, 环境温度升高后, 太阳辐

射增强对蒸发速率的提升更显著。

5.3 利用太阳能提升主缆除湿效率

针对本文主缆除湿过程中探讨的7个因素, 结合上述分析发现太阳辐射强度增强, 会促进主缆内部积水蒸发速率的提升。鉴于太阳能作为人类目前使用可再生清洁能源的一种重要形式^[27,28], 其高效利用对于提升主缆除湿效率具有重大意义。

为此, 提出将主缆外表面采用深色涂料进行覆盖, 以显著提升主缆表面对太阳能的吸收率。现将3.2节模型验证中润扬长江大桥编号2主缆密封层漆面由灰白色改为黑色, 吸收率由0.2变为0.9, 表面发射率维持在0.9水平, 其中扬州市当地全年各个季节平均气候统计如表4所示。

修改主缆外表面的涂层颜色前后对应的蒸发速率对比如图9所示。可以发现不同季节环境温度更改涂层前后对比蒸发速率在各个季节提升11%~18%。夏季温度最高, 提升主缆表面对太阳能的吸收率对蒸发速率提升最大, 约为18%; 冬季温度最低, 提升主缆表面对

表4 扬州市各个季节气候参数

Table 4 Seasonal climatic data for Yangzhou City

季节	辐射强度	环境温度	环境风速
春季	193 W/m ²	288 K	3.37 m/s
夏季	233 W/m ²	300 K	3.84 m/s
秋季	159 W/m ²	290 K	3.27 m/s
冬季	116 W/m ²	277 K	3.10 m/s

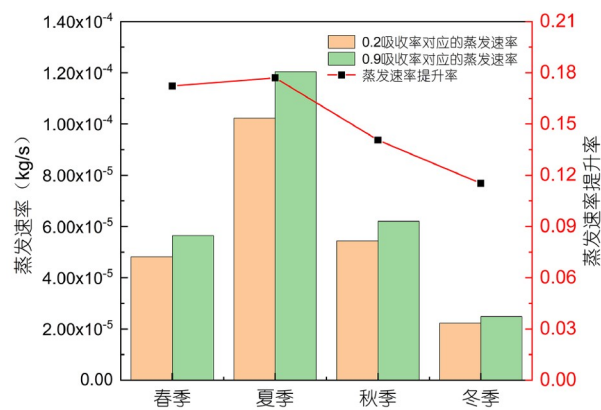


图9 (网络版彩图)改变主缆表面吸收率后各个季节蒸发速率的变化

Figure 9 (Color online) Evaporation rate increase in each season after increasing the surface absorption rate of the main cable.

太阳能的吸收率对蒸发速率提升最小, 约为11%。

6 结论

本文构建了一个在自然环境中更为全面的主缆除湿传热传质模型。通过响应面方法设计7因素3水平实验, 将主缆内部送气参数(进气温度、进气速度、进气压力、进气相对湿度)和主缆外部环境因素(太阳辐射强度、环境温度、环境风速)的耦合作用对悬索桥主缆除湿过程的影响进行分析, 有关结论如下。

(1) 通过响应面方法分析得到主缆内外各因素对主缆除湿过程蒸发速率影响的敏感程度。其中, 进气相对湿度、进气速度、环境温度和太阳辐射强度起主要作用。外部因素中, 环境温度>太阳辐射强度>环境风速; 内部因素中, 相对湿度>进气速度>通气压力>进气温度。并通过对数方法拟合出了在一定范围内适用的蒸发速率公式。

(2) 通过对内部参数与其显著交互参数分析发现, 内部进气参数通过传热传质方式, 影响积水的饱和蒸气压力和传质系数来改变蒸发速率。增加进气速度, 会使蒸发速率变化呈上升趋势并逐渐平缓, 并且蒸发速率的提升效果会随环境温度升高和进气温度升高更显著。升高进气温度对蒸发速率的提升效果, 会在进气速度高时更显著。所以, 在考虑以经济性和主缆密封安全为前提下, 适当增大进气速度和提高进气温度可以获得更好的除湿效果。

(3) 分析外部参数与其显著交互参数发现, 外部环境参数主要通过传热方式, 影响积水饱和蒸气压力和传质系数来改变蒸发速率。环境风速变大, 使蒸发速率变化呈下降趋势并逐渐趋于平缓, 平缓点速度约为6 m/s, 同时蒸发速率降低的幅度, 会随辐射强度增强和环境温度升高更明显。环境温度升高能显著提高蒸发速率, 但环境风速变大, 由环境温度升高所导致蒸发速率提升的幅度会相对变小。太阳辐射增加可以有效提升蒸发速率, 并且环境温度越高效果越突出。

(4) 在除湿过程中强化主缆外表面对太阳能的吸收率, 可以有效地利用太阳能来加速除湿效率进而减少功耗。以润扬大桥编号2主缆为例, 将主缆外表面密封层颜色涂成黑色, 主缆在不同季节的蒸发速率均有所提升, 春季提升17.2%, 夏季提升18%, 秋季提升14.1%, 冬季提升11.5%。

附录

表 A1 回归模型的方差分析及回归系数的显著性检验结果

来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
模型	39.28	35	1.12	6372.1	< 0.0001
A	0.3985	1	0.3985	2262.15	< 0.0001
B	36.68	1	36.68	2.08×10^5	< 0.0001
C	0.1061	1	0.1061	602.33	< 0.0001
D	0.8467	1	0.8467	4807.04	< 0.0001
E	0.9812	1	0.9812	5570.86	< 0.0001
F	0.0082	1	0.0082	46.49	< 0.0001
G	0.0183	1	0.0183	104.03	< 0.0001
AB	0.0014	1	0.0014	7.75	0.0099
AC	0.0282	1	0.0282	160.05	< 0.0001
AD	0	1	0	0.0815	0.7775
AE	4.73×10^{-8}	1	4.73×10^{-8}	0.0003	0.9871
AF	8.17×10^{-7}	1	8.17×10^{-7}	0.0046	0.9462
AG	4.97×10^{-10}	1	4.97×10^{-10}	2.82×10^{-6}	0.9987
BC	0.0032	1	0.0032	18.35	0.0002
BD	0.0015	1	0.0015	8.36	0.0077
BE	2.18×10^{-6}	1	2.18×10^{-6}	0.0124	0.9124
BF	0.0001	1	0.0001	0.7733	0.3872
BG	6.19×10^{-8}	1	6.19×10^{-8}	0.0004	0.9852
CD	0.0001	1	0.0001	0.3177	0.5778
CE	3.01×10^{-7}	1	3.01×10^{-7}	0.0017	0.9674
CF	0.0003	1	0.0003	1.73	0.1999
CG	5.31×10^{-9}	1	5.31×10^{-9}	0	0.9957
DE	4.08×10^{-8}	1	4.08×10^{-8}	0.0002	0.988
DF	0.001	1	0.001	5.96	0.0218
DG	3.82×10^{-8}	1	3.82×10^{-8}	0.0002	0.9884
EF	3.43×10^{-10}	1	3.43×10^{-10}	1.95×10^{-6}	0.9989
EG	2.55×10^{-9}	1	2.55×10^{-9}	0	0.997
FG	9.45×10^{-12}	1	9.45×10^{-12}	5.37×10^{-8}	0.9998

与表A1对应的响应面原始方程如下式(A1)所示.

$$\begin{aligned}
 \ln(\dot{m}) = & -54.21873 + 1.395 \times 10^{-3} A + 0.205557 B - 0.101716 C + 10.10299 D - 0.947071 E + 0.002876 F \\
 & + 0.00007 G - 2.12405 \times 10^{-6} AB - 6.40 \times 10^{-5} AC - 1.09 \times 10^{-4} AD + 1.66691 \times 10^{-6} AE \\
 & - 5.19701 \times 10^{-8} AF - 2.56294 \times 10^{-11} AG + 3.35 \times 10^{-4} BC - 1.6958 \times 10^{-2} BD + 1.74 \times 10^{-4} BE \\
 & - 1.00 \times 10^{-5} BF - 4.39777 \times 10^{-9} BG - 2.2039 \times 10^{-2} CD - 4.31 \times 10^{-4} CE - 1.03 \times 10^{-4} CF \\
 & + 8.58783 \times 10^{-9} CG + 1.1904 \times 10^{-2} DE + 1.4315 \times 10^{-2} DF + 1.72853 \times 10^{-6} DG + 2.18158 \times 10^{-6} EF \\
 & + 1.19091 \times 10^{-7} EG - 5.43318 \times 10^{-11} FG - 1.14152 \times 10^{-8} A^2 - 2.39 \times 10^{-4} B^2 + 3.39 \times 10^{-3} C^2 \\
 & - 41.29954 D^2 - 0.927832 E^2 + 1.19437 \times 10^{-6} F^2 - 2.00285 \times 10^{-10} G^2.
 \end{aligned} \tag{A1}$$

参考文献

- 1 Guan Z G, Li J Z. Advances in earthquake resisting systems for long-span bridges (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2021, 51: 493–504 [管仲国, 李建中. 大跨度桥梁抗震体系研究. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 493–504]
- 2 Guo X F, Zhou H M, Cheng Q, et al. Rock mechanics comprehensive study of tunnel anchorage for super large suspension bridge (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2018, 48: 799–809 [郭喜峰, 周火明, 程强, 等. 特大悬索桥隧道锚岩石力学综合研究. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 799–809]
- 3 Hu Z, Shah Y I, Li X, et al. Main cable shape of short span in three-tower suspension bridge. *Struct Eng Int*, 2022, 32: 547–555
- 4 Neeladharan C, Gayathri G, Rasigha J, et al. Analysis and design of suspension cable bridge. *Int J Innovative Res Sci Eng Tech*, 2017, 6: 67–69
- 5 Yang Y, Fahmy M F M, Guan S, et al. Properties and applications of FRP cable on long-span cable-supported bridges: A review. *Compos Part B-Eng*, 2020, 190: 107934
- 6 Song Y, Zhang X S, Liu J, et al. Design and experimental study of joint dehumidification system for main cables of suspension bridges (in Chinese). *Build Sci*, 2023, 39: 134–143 [宋翼, 张小松, 刘剑, 等. 悬索桥主缆联合除湿系统设计与实验研究. 建筑科学, 2023, 39: 134–143]
- 7 Thee C, Hao L, Dong J, et al. Atmospheric corrosion monitoring of a weathering steel under an electrolyte film in cyclic wet–dry condition. *Corrosion Sci*, 2014, 78: 130–137
- 8 Sugimura M, Nakayama M, Mutaguchi T, et al. Repair project of existing suspension bridges for long lifespan. *IHI Eng Rev*, 2019, 52: 16–23
- 9 Song S Y, Chen H Y, Cheng Q, et al. Characterization of wire-scale flow in the dehumidification process of main cables of suspension bridges (in Chinese). *Bridge Constr*, 2023, 53: 25–32 [宋神友, 陈焕勇, 程潜, 等. 悬索桥主缆除湿过程中钢丝尺度流动特性研究. 桥梁建设, 2023, 53: 25–32]
- 10 Chen C, Ji L. Calculation of air flow resistance of main cable of suspension bridge based on model test (in Chinese). *Bridge Constr*, 2010, 6: 40–43 [陈策, 吉林. 基于模型试验的悬索桥主缆空气流动阻力计算. 桥梁建设, 2010, 6: 40–43]
- 11 Tu Z Y, Peng F S, Wei Z J, et al. Simplified calculation of flow resistance of suspension bridge main cable dehumidification system. *Fluid Dyn Mater Proc*, 2021, 17: 1195–1211
- 12 Yao Z A, Kang Z S, Ni Y, et al. Dehumidification performance of main cables of suspension bridges under different wire stacking states (in Chinese). *Sci Tec Eng*, 2021, 21: 3807–3813 [姚志安, 康壮苏, 倪雅, 等. 不同钢丝堆积态下悬索桥主缆除湿性能. 科学技术与工程, 2021, 21: 3807–3813]
- 13 Zhou X D, Ni Y, Kang Z S, et al. Optimization study of main cable intake method of suspension bridge based on CFD (in Chinese). *Highway*, 2022, 67(8): 152–157 [周旭东, 倪雅, 康壮苏, 等. 基于CFD的悬索桥主缆进气方式的优化研究. 公路, 2022, 67(8): 152–157]
- 14 Ju X L, Cao S G, Cheng J X, et al. Analysis of temperature and humidity variations in main cables of suspension bridges considering initial water accumulation (in Chinese). *Highway*, 2019, 64: 72–78 [具鑫兰, 曹素功, 程嘉稀, 等. 考虑初始积水的悬索桥主缆温湿度变化分析. 公路, 2019, 64: 72–78]
- 15 Zhang W. Study on thermal stress theory and structural temperature effect of main cable of suspension bridge based on solar radiation (in Chinese). Dissertation for the Doctoral Degree. Chongqing: Chongqing University, 2015. 58–59 [张伟. 基于日照辐射的悬索桥主缆热应力理论及结构温度效应研究. 博士学位论文. 重庆: 重庆大学, 2015. 58–59]
- 16 Jia D Y, Sui L Y, He M L. Experimental study on mass transfer coefficient of dry air in main cable of suspension bridge. *Adv Mater Res*, 2012, 461: 151–154
- 17 Wei Z J, Peng F S, Miao X P, et al. Numerical calculation and experimental research on ventilation and dehumidification of main cable of suspension bridge (in Chinese). *J Eng Thermophysics*, 2016, 37: 2495–2501 [魏子杰, 彭福胜, 缪小平, 等. 悬索桥主缆通风除湿数值计算及实验研究. 工程热物理学报, 2016, 37: 2495–2501]
- 18 Jiangsu Changjiang Highway Bridge Construction Command, Jiangsu Transportation Planning and Design Institute. Key technology of dehumidification system for main cable of suspension bridge (in Chinese). Beijing: Science Press, 2015. 39–40 [江苏省长江公路大桥建设指挥部, 江苏省交通规划设计院. 悬索桥主缆除湿系统关键技术. 北京: 科学出版社, 2015. 39–40]
- 19 Chen S. Analytical study on the protection of main cables of long-span suspension bridges (in Chinese). Dissertation for the Doctoral Degree. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. 30–31 [陈胜. 大跨悬索桥主缆防护的分析研究. 博士学位论文. 大连: 大连理工大学, 2012. 30–31]
- 20 Yang S M, Tao W Q. Heat Transfer (in Chinese). 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006. 251–252, 383–384, 545–546 [杨世铭, 陶文铨.

- 传热学. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2006. 251–252, 383–384, 545–546]
- 21 Yao Y, Liu Y C, Deng Y, et al. Optimization of correlations for latent heat of evaporation calculations (in Chinese). *Energy-Saving Tech*, 2021, 39: 387–392 [姚尧, 刘益才, 邓炎, 等. 蒸发潜热计算关联式的优化. *节能技术*, 2021, 39: 387–392]
- 22 Sutherland W. The viscosity of gases and molecular force. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Maga J Sci*, 1893, 36: 507–531
- 23 Li R H. Fundamentals of Mass Transfer (in Chinese). Beijing: Beijing Aviation Academy Press, 1987. 65–66 [李汝辉. 传质学基础. 北京: 北京航空学院出版社, 1987. 65–66]
- 24 Chen X M, Zhao Z W. A comparative study of water vapor pressure formulas in tropospheric refraction corrections (in Chinese). *J Spacecraft TT C Tec*, 2013, 32: 479–483 [陈祥明, 赵振维. 对流层折射修正中水汽压公式对比研究. *飞行器测控学报*, 2013, 32: 479–483]
- 25 Li H, Du H C, Xue G X. Introduction of dehumidification system for main cable of Runyang Changjiang River Bridge Suspension Bridge (in Chinese). In: Wang Y H, Wu Z C, Zeng X W. 2004 National Bridge Symposium of Bridge and Structural Engineering Branch of Chinese Highway Society. Beijing: China Communication Press, 2004. 5 [李海, 杜洪池, 薛光雄. 润扬长江大桥悬索桥主缆除湿系统简介. 见: 王永珩, 吴忠彩, 曾宪武. 中国公路学会桥梁和结构工程分会2004年全国桥梁学术会议. 北京: 人民交通出版社, 2004. 5]
- 26 Jiangsu Yangzi Bridge Co., Ltd., Jiangsu Province Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., ZhenJiang Blue Hublot Engineering Technology Co., Ltd. Jiangyin Bridge Installation of Main Cable Dehumidification System Key Technology (in Chinese). Beijing: Science Press, 2016. 28, 148–149 [江苏扬子大桥股份有限公司, 江苏省交通规划设计院股份有限公司, 镇江蓝舶工程科技有限公司. 江阴大桥增设主缆除湿系统关键技术. 北京: 科学出版社, 2016. 28, 148–149]
- 27 He Y L, Wang K, Du B C, et al. Non-uniform characteristics of solar flux distribution in the concentrating solar power systems and its corresponding solutions: A review (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 3208–3237 [何雅玲, 王坤, 杜保存, 等. 聚光型太阳能热发电系统非均匀辐射能流特性及解决方法的研究进展. *科学通报*, 2016, 61: 3208–3237]
- 28 Wang L, Zhang Z, Shi Y L, et al. Research progress of parabolic trough solar collector based on numerical simulation (in Chinese). *Power Gener Tec*, 2021, 42: 643–652 [王立, 张智, 施瑶璐, 等. 基于数值仿真的抛物槽式太阳能集热器研究进展. *发电技术*, 2021, 42: 643–652]
- 29 Ma R, Sun J, Li D H, et al. Concentrated solar energy-driven self-floating high-efficiency catalytic decomposition system for hydrogen production from seawater vaporization based on Cu/TiO₂/C-wood composites (in Chinese). *CIESC J*, 2022, 73: 1695–1703 [马荣, 孙杰, 李东辉, 等. 基于Cu/TiO₂/C-wood复合材料的聚光太阳能驱动自漂浮高效海水汽化催化分解制氢体系. *化工学报*, 2022, 73: 1695–1703]

Study of the heat and mass transfer characteristics of the main cable dehumidification process under internal and external environments

XU Yang¹, CUI Ming¹, WEI Yong¹, NI Ya¹, YANG ZhenHua²,
DU GaoMing³ & ZHENG ZhangJing¹

Main cable dehumidification is one of the most important tasks in the maintenance of suspension bridges. The accurate prediction of the characteristics of the main cable dehumidification process is a prerequisite for developing an efficient dehumidification system. However, the internal structure of the main cable is complicated, and the main cable dehumidification process is significantly affected by the natural environment and operating conditions. Therefore, a more comprehensive heat and mass transfer model for main cable dehumidification is constructed in this paper. This model integrates the coupling effects of internal air supply parameters (i.e., inlet speed, inlet relative humidity, inlet temperature, and inlet pressure) and external environmental factors (i.e., solar radiation intensity, environmental temperature, and environmental wind velocity) on the main cable dehumidification process of suspension bridges. The sensitivity of each parameter is analyzed via the response surface methodology. The results show that relative humidity and velocity of inlet air, environmental temperature, and solar radiation intensity are the main factors affecting the evaporation rate of water in the main cable. The discussion of the interaction of the aforementioned factors on the evaporation rate reveals that increasing the inlet velocity can enhance the evaporation rate. However, the upward trend of the evaporation rate plateaus as the inlet velocity continues to increase. The enhancement of the evaporation rate by increasing the inlet velocity becomes more significant with the increase in environmental and inlet temperatures. Moreover, increasing the environmental wind velocity decreases the evaporation rate. However, the downward trend of the evaporation rate with the increase in environmental wind velocity gradually plateaus, and the velocity at the flattening point is approximately 6 m/s. The decrease in evaporation rate due to the increase in environmental wind velocity becomes more pronounced with the increase in environmental temperature and radiation intensity. Furthermore, the increase in solar radiation intensity can effectively improve the evaporation rate, and the effect is more prominent at higher environmental temperatures. The solar radiation intensity increases from 0 W/m² to 615 W/m², and the evaporation rate increases by 26.3% at an ambient temperature of 313.15 K. This increase in evaporation rate is 9.7 times that of the increased evaporation rate at an ambient temperature of 273.15 K. The increase in the surface absorption rate of the main cable can further improve the dehumidification efficiency of the main cable using solar energy. Taking Runyang Bridge as an example, when the absorption rate increases from 0.2 to 0.9, the evaporation rate increases by 11%–18% in different seasons. This paper provides a more comprehensive theoretical basis and engineering guidance for the development and improvement of the main cable dehumidification system.

main cable dehumidification, internal and external environment, response surface, convective heat transfer, convection mass transfer, solar radiation

doi: [10.1360/SST-2024-0137](https://doi.org/10.1360/SST-2024-0137)