

热泵换热器管束在湿 - 热 - 机耦合下的大变形分析

李清禄^{1*}, 马小龙¹, 潘兆一²

¹兰州理工大学理学院, 甘肃 兰州

²甘肃新农生态能源环保科技有限公司, 甘肃 定西

收稿日期: 2025年12月26日; 录用日期: 2026年1月27日; 发布日期: 2026年3月4日

摘要

研究热泵换热器管束在湿 - 热 - 机环境下的非线性大变形行为。首先建立了多物理场作用下的非线性大变形控制微分方程。采用数值方法分析了泡沫金属梁式换热器管束在湿 - 热 - 机载荷下非线性大变形行为。给出了不同升温 and 不同湿度下细长管束转角和弯矩与受力之间的关系路径曲线图。讨论了升温以及湿度变化对管束弯曲行为的影响。结果表明: 随着均匀湿热和非均匀湿热的增加, 管束的变形都增加; 相同条件下, 非均匀湿热对结构的变形影响较小。

关键词

换热器管束, 湿 - 热 - 力耦合, 大变形, 打靶法

Analysis of Large Deformation of Heat Exchanger Tube Bundles under Wet-Heat Mechanical Coupling

Qinglu Li^{1*}, Xiaolong Ma¹, Zhaoyi Pan²

¹School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu

²Gansu Xinnong Ecological Energy and Environmental Technology Co., Ltd., Dingxi Gansu

Received: December 26, 2025; accepted: January 27, 2026; published: March 4, 2026

Abstract

Study the nonlinear large deformation behavior of heat pump heat exchanger bundle beams in a

*通讯作者。

文章引用: 李清禄, 马小龙, 潘兆一. 热泵换热器管束在湿-热-机耦合下的大变形分析[J]. 力学研究, 2026, 15(1): 11-18.
DOI: 10.12677/ijm.2026.151002

humid thermal mechanical environment. Firstly, a nonlinear large deformation control differential equation under the action of multiple physical fields was established. The nonlinear large deformation behavior of foam metal beam heat exchanger tube bundles under wet-heat-mechanical loads was analyzed using numerical methods. The relationship path curves between the angle and bending moment of the slender tube bundle and the force under different heating and humidity conditions were provided. The influences of temperature rise as well as humidity changes on the bending behaviors of tube bundles were discussed. The results show that with the increase of uniform and non-uniform damp heat, the deformation of the tube bundle increases; Under the same conditions, the influence of non-uniform damp heat on the deformation of the structure is relatively small.

Keywords

Heat Exchanger Tube Bundle, Wet-Thermal-Mechanical Coupling, Large Deformation, Shooting Method

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

换热器是空气能热泵的关键部件之一，在实际工程中换热器管束的变形备受关注[1]。管束往往不但受到高温热流的冲刷，同时也会受到壳体内湿度的影响。另外，当进行逆流换热时，管束和水流之间的粘性阻力是不可忽略的。基于上述分析，管束在湿-热-力多物理场耦合作用下，其变形乃至失稳的机理较为复杂。长期以来，国内外学者针对该问题进行了大量实验参数的研究，并提出了诸多预测模型和设计建议，为换热器的设计提供了重要依据[2]-[4]。其中文献[2]指出，换热器管束的失效原因之一是管束内外温度差大造成的，另外热疲劳也是引起管束失效的原因之一。通过现场实验也得出类似的结论，但无法给出具体的失效规律。

针对该问题的研究主要涵盖流体力学实验与力学模型分析两个方面，但在测量方法上存在局限性，无法获取需要的关键试验参数。郭凯等[5]分析了横流冲刷对管束失稳的影响，研究表明：当换热器管束受到流体横向冲刷时，最危险的情况是会引发一种称为流体弹性失稳的力学现象。水流和管束之间产生的粘性阻力属于摩擦力，是一种非保守力，可以视为均匀分布的随从载荷，其方向随结构的变形而变形。

在现有换热器中，管束材料以纯铜为主，而本研究提出了一种泡沫金属换热器。泡沫金属换热器相比纯铜换热器管束有很多优点，主要体现在传热效率更高、结构更加紧凑轻量化，以及具备多功能性。另外，泡沫金属换热器具备良好的降噪吸音能力，可用于降低工业设备噪音。

本文从受力角度分析换热器管束的非线性大变形力学行为。将泡沫金属管束看作是细长的圆形截面梁，建立了湿-热-随从载荷多变量耦合下，管束梁大变形分析的力学模型，并采用数值方法对多个变量相互耦合的控制微分方程进行求解。获得了换热器管束梁在极端湿-热环境下弯曲或屈曲的力-热-变形关系，分析了各参数对管束梁变形的影响，以期对换热器管束的参数设计提供理论支撑。

2. 换热器管束工作时的力学模型

热泵内部的换热器管束是非常重要的部件之一，服役于超极端热以及高湿的工作环境中，同时由于水流的侵蚀，其与管束之间产生不可忽略的摩擦作用。因此，研究湿-热-力耦合作用下的力学行为十分重要。

将换热器管束看作是圆形截面的细长梁，其直径为 d 。根据实际工作情况，管束一端固定，一端看

作可移简支。水平向右方向为 x 轴，沿截面高度方向为 z 轴，坐标原点置于管束左侧中心。温度 T 和湿度 C 沿厚度方向稳态分布，将管束受到的流体作用以及摩擦力看作是梁式管束上沿轴线均匀分布的随从载荷 \tilde{q} ，特别需要说明的是，随从载荷可以分解为水平和横向载荷，横向载荷包括横向流体力的分量(见图 1)。

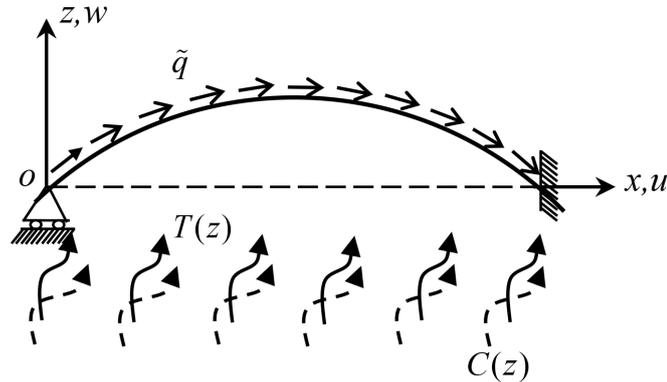


Figure 1. Schematic diagram of stress and deformation of fixed-simply supported beam

图 1. 简支 - 固支梁的变形示意图

2.1. 温度场和湿度场的描述

假设管束梁上表面受到的温度和湿度分别为 T_t 和 C_t ，管束梁下表面的温度和湿度分别为 T_b 和 C_b ，则 $T_r = T_t/T_b$ 、 $C_r = C_t/C_b$ ；并考虑管束梁内部不会因温度或湿度差引起能量迁移。

沿厚度方向呈线性变化的非均匀湿 - 热升温，温度场和湿度场的表达式为[6]：

$$T(z) = T_b + (T_t - T_b) \left(\frac{z}{d} + \frac{1}{2} \right) = T_m + \frac{z}{d} T_d \quad (1)$$

$$C(z) = C_b + (C_t - C_b) \left(\frac{z}{d} + \frac{1}{2} \right) = C_m + \frac{z}{d} C_d \quad (2)$$

其中， $T_m = (T_t + T_b)/2$ 和 $C_m = (C_t + C_b)/2$ 为截面内的平均升温和平均湿度， $T_d = T_t - T_b$ 和 $C_d = C_t - C_b$ ，为表面温度差和表面湿度差。室温取为 $T_0 = 27.3^\circ\text{C}$ ，自然湿度为 $C_0 = 40\%\text{RH}$ 。显然，当 $T_d = C_d = 0$ 时，上述温度场退化为均匀温度场。

2.2. 控制微分方程

弹性应变：

$$\varepsilon = \Lambda - 1 - \frac{d\theta}{dx} z \quad (3)$$

温度和湿度应变分别为：

$$\varepsilon_T = \alpha \cdot (T - T_0) \quad (4)$$

$$\varepsilon_C = \beta \cdot (C - C_0) \quad (5)$$

湿热条件下的本构方程为：

$$\sigma = E \cdot (\varepsilon - \varepsilon_T - \varepsilon_C) \quad (6)$$

其中： θ 为管束梁变形后与水平方向的夹角， Λ 为轴线伸长率， α 和 β 分别为热和湿膨胀系数。

参考文献[7][8], 各变量相互耦合的无量纲非线性控制微分方程为:

$$\frac{dS}{dX} = \Lambda, \quad \frac{dU}{dX} = \Lambda \cos \theta - 1, \quad \frac{dW}{dX} = \Lambda \sin \theta \quad (7)$$

$$\frac{d\theta}{dX} = \left(M - \frac{\tau_d}{12\delta} - \frac{c_d}{12\delta} \right) \quad (8)$$

$$\frac{dP_H}{d\xi} = \Lambda q \cos \theta, \quad \frac{dP_V}{dX} = \Lambda q \sin \theta \quad (9)$$

$$\frac{dM}{dX} = \Lambda (-P_H \sin \theta + P_V \cos \theta) \quad (10)$$

其中: $\Lambda = 1 - \frac{1}{16\delta^2}(P_H \cos \theta + P_V \sin \theta - \tau_m - c_m)$ 。

上面方程中各参数的物理意义和文献[8]一致。

上述方程的无量纲变换如下:

$$(\xi, S, U, W) = (x, s, u, w)/l, \quad \delta = l/d, \quad (q, P_H, P_V, M) = \frac{64}{\pi d^4 E} (\tilde{q}l^3, Hl^2, Vl^2, ml) \quad (11)$$

热轴力和热弯矩为:

$$(N_T, M_T) = \iint_A \alpha T(1, z) dA \quad (12)$$

湿轴力和湿弯矩为:

$$(N_C, M_C) = \iint_A \beta C(1, z) z dA \quad (13)$$

其中: $(\tau_m, \tau_d) = 16\delta^2 \alpha (T_m, T_d)$, $(c_m, c_b) = 16\delta^2 \beta (C_m, C_d)$ 。

图1中梁的无量纲边界条件为:

$$S(0) = W(0) = P_H(0) = M(0) = 0, \quad \theta(0) = \beta \quad (14)$$

$$U(1) = W(1) = \theta(1) = 0. \quad (15)$$

式(11)中的 β 为梁的左端转角。这样, 管束式梁在湿-热-力多场耦合作用下的非线性力学行为就可归结为两点边值问题。

3. 数值结果和讨论

方程(7)是七个变量相互耦合的方程组, 具有很强的非线性性, 只能通过数值方法求其数值解。常用的数值方法众多, 而打靶法在求解此类方程时具有其他数值解法不具备的优势, 主要体现在无需进行大规模的稀疏线性代数运算。因此, 本文采用打靶法进行数值计算, 具体方法和过程可参考文献[9]:

对于钢制开孔泡沫金属换热器梁, 其物性参数取自文献[8]: $E = 120 \text{ GPa}$, $\alpha = 1.7 \times 10^{-6} / \text{K}$, $\beta = 5 \times 10^{-4}$ 。

首先考虑均匀温度场和均匀湿度场的情况。设湿度为 $C_i = C_b = 100\% \text{ RH}$, 图2给出了不同均匀温度场下左端转角和力之间的关系图; 图3为固定端弯矩在不同均匀湿热温度下与随从力之间的关系曲线。可以看出: 在湿热环境下, 梁均发生屈曲失稳; 随着非均匀升温的增加, 梁失稳时的临界力减小, 意味着温度越高, 梁越容易失去稳定性。进入后屈曲阶段, 左端转角和固定端弯矩都随着随从力的增加而增大, 且温度越高, 转角和弯矩越大。

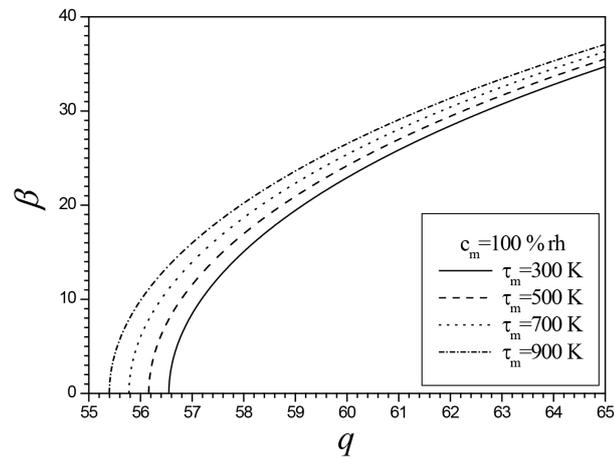


Figure 2. $\beta(0) - q$ relationship curves for different uniform heating conditions
图 2. 不同均匀升温下 $\beta(0) - q$ 的关系曲线

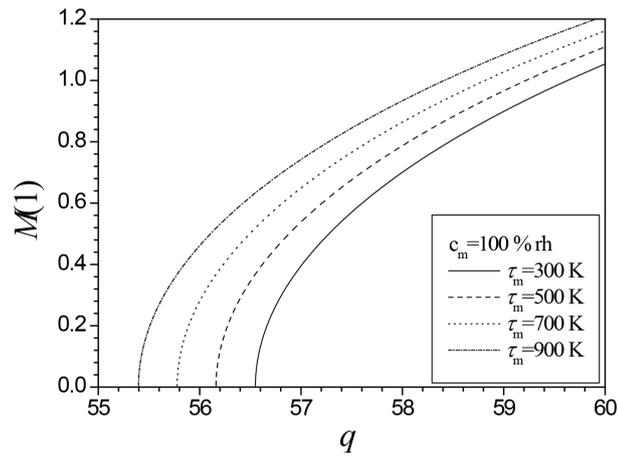


Figure 3. $M(1) - q$ relationship curves for different uniform heating conditions
图 3. 不同均匀升温下 $M(1) - q$ 的关系曲线

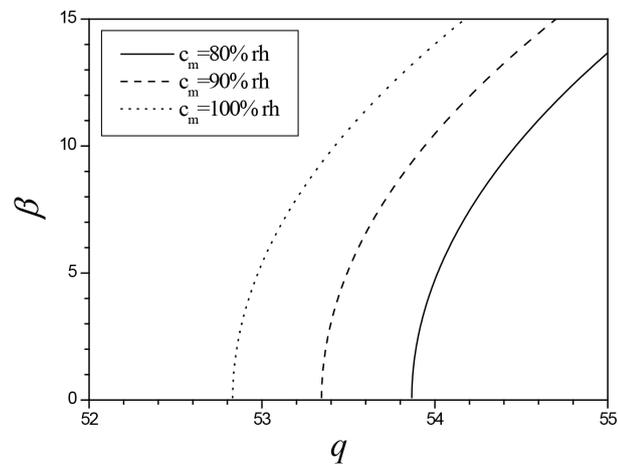


Figure 4. $\beta(0) - q$ relationship curves for different uniform humidity
图 4. 不同均匀湿度下 $\beta(0) - q$ 的关系曲线

图 4 显示的是均匀温度为 $T_t = T_b = 600 \text{ K}$ ，即温度达到 32°C 时的情况。同样可以看出，湿度对换热器管束的失稳有显著影响。湿度越大，管束梁越容易失稳。

其次考虑非均匀湿度和非均匀温度的影响。图 5 为随从力和左端转角的关系图，图 6 为右端弯矩和随从力的关系曲线。从图可见，非均匀升温下，梁并不发生失稳，而是一般的弯曲变形；同样条件下，非均匀升温越高，梁的变形也越大。可见，非均匀升温下的力学特性和均匀升温下完全不同，采用非均匀升温不会引起屈曲这种突然的横向弯曲现象。

图 7 为不考虑湿度影响时，不同均匀升温场中的屈曲构形图。不难看出，温度越高，梁的变形越大，表明随着温度的升高，管束变形越大。因此，高温对管束的影响显著。图 8 刻画的是非均匀升温下的弯曲构形图。由图可知，在同一随从力作用下会出现多构形现象。在变形较小的阶段，受力相同时，非均匀温度越高，变形越大；而在变形较大的阶段，非均匀升温越高，变形相对会越小。考虑到实际问题中变形通常不会很大，因此可以得出结论：非均匀升温越高，梁的变形越大。

综上所述，不管是均匀还是非均匀湿条件下，湿度的影响也有上述类似情况。

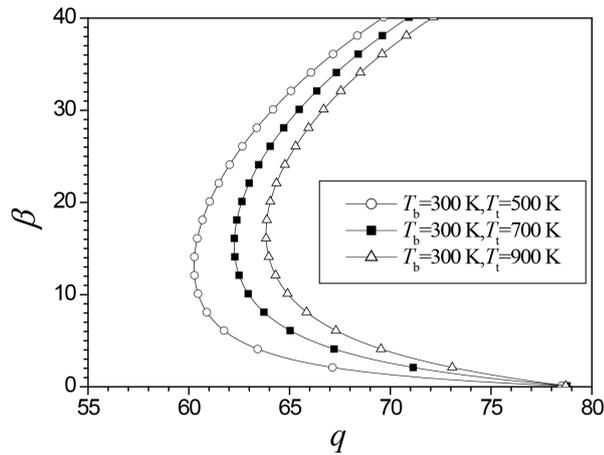


Figure 5. The influence of non-uniform humidity on the $\beta(0) - q$ relationship curves

图 5. 非均匀湿度对 $\beta(0) - q$ 的关系曲线影响

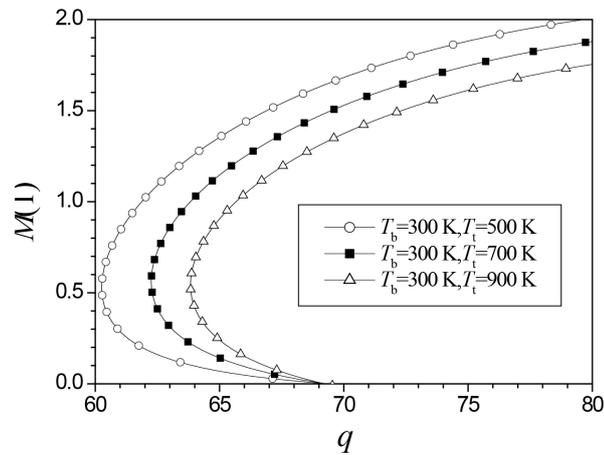


Figure 6. The influence of non-uniform humidity on the $M(1) - q$ relationship curves

图 6. 非均匀湿度对 $M(1) - q$ 的关系曲线影响

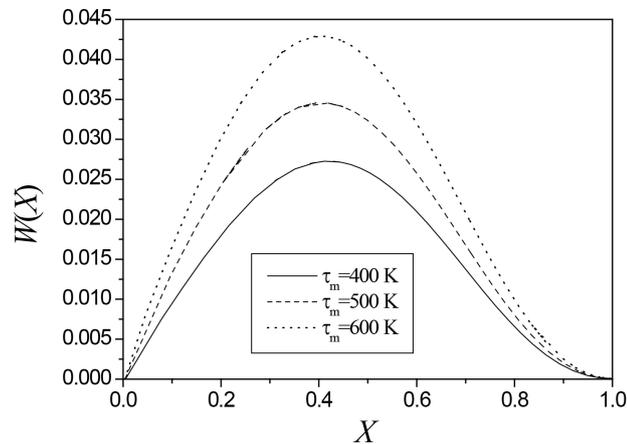


Figure 7. Bending configuration diagram under uniform heating conditions

图 7. 均匀升温下的弯曲构形图

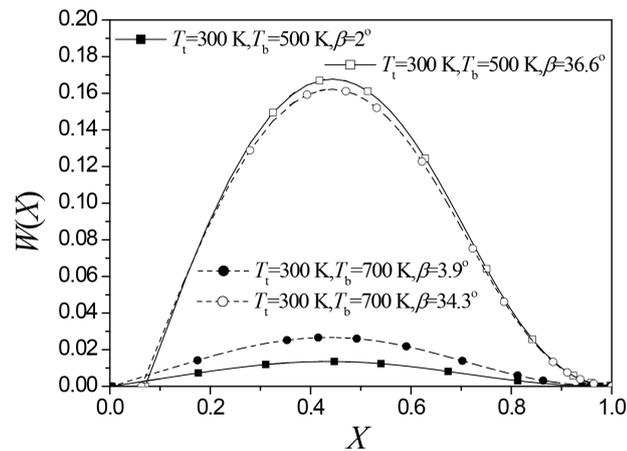


Figure 8. Bending configuration diagram under non-uniform heating conditions

图 8. 非均匀升温下的弯曲构形图

4. 结论

本文研究了换热器管束式梁在湿-热-力耦合作用下的大变形力学行为。结果表明：

- 1) 均匀湿热环境中，管束梁发生典型的分叉屈曲；而非均匀湿热条件下，管束梁发生的是弯曲行为；
- 2) 当均匀湿热增加时临界载荷会减小；在后屈曲阶段，结构的变形随外力的增大而非线性增加，相同的随从力条件下，温度越高，梁变形越大；
- 3) 当处于非均匀湿热环境中时，随着变形的增加，管束和水流之间产生的摩擦力也减小；当变形增加到某一值时，随着变形的增加，摩擦力又开始增加；
- 4) 均匀升温下梁对应一种构形，而非均匀升温下会对应两种弯曲构形；其研究结果对换热器管束在复杂湿热环境下的疲劳失效设计有理论指导。

基金项目

甘肃省重大科技计划项目(24DCJ001)。

参考文献

- [1] 余建祖, 谢永奇, 高红霞. 换热器原理与设计[M]. 第2版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2019.
- [2] 马殿国, 郝凤丹, 陈立志. 换热器管束开裂失效分析[J]. 中国化工装备, 2021, 23(3): 33-36.
- [3] 陈继程, 韩利, 胡宝庆, 孟嘉钰. 换热器管束短期失效分析及对策[J]. 山西化工, 2020, 40(5): 154-155, 158.
- [4] Hu, Q., Wang, J., Gao, Y. and Peng, W. (2022) Numerical Study of Thermal-Hydraulic and Dust-Deposition of Tube Bundles in an Intermediate Heat Exchanger. *International Journal of Hydrogen Energy*, **47**, 27187-27198. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.023>
- [5] 郭凯, 谭蔚, 曹丽琴, 等. 横流冲刷下换热器管束流体弹性失稳的研究进展[J]. 压力容器, 2021, 38(7): 70-76.
- [6] Reddy, J.N. and Chin, C.D. (1998) Thermomechanical Analysis of Functionally Graded Cylinders and Plates. *Journal of Thermal Stresses*, **21**, 593-626. <https://doi.org/10.1080/01495739808956165>
- [7] 李清禄, 杨凡转, 张清华. 热环境中非保守简支-固支 FGM 梁的非线性力学行为[J]. 航空材料学报, 2019, 39(2): 84-89.
- [8] 李清禄, 王思瑶, 张清华. 湿-热-机耦合梯度多孔材料梁的非线性力学行为[J]. 航空材料学报, 2022, 42(3): 38-44.
- [9] Li, Q. and Zhang, H. (2023) Influence of Surface Effect on Post-Buckling Behavior of Graded Porous Nanobeam Subjected to Follower Force. *Microsystem Technologies*, **29**, 779-791. <https://doi.org/10.1007/s00542-023-05458-1>