

工业生产中冷却平台的非稳态导热数值研究*

刘军强, 宁 珍, 唐 强, 张永恒

(兰州交通大学 机电学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 通过介绍工业生产中一冷却平台的结构和工作环境, 建立模型, 对该模型进行了初边条件的设定和网格的划分, 并在三维适体坐标下对非稳态无内热源导热方程离散。应用在不同尺寸模型下的数值计算, 得到冷却平台的温度场和符合生产要求的非稳态导热时间, 并对结果进行了分析和论证。

关键词: 冷却平台; 非稳态导热; 数值研究

中图分类号: TH123

文献标志码: A

文章编号: 1007-4414(2013)01-0048-02

Numerical study of the unsteady state heat conduction of cooling platform in industrial production

Liu Jun-qiang, Ning Zhen, Tang Qiang, Zhang Yong-heng

(Mechanical and electrical college of Jiaotong university, Lanzhou Gansu 730030, China)

Abstract: Through the introduction of a cooling platform structure and working environment in industrial production, its models is established, the initial boundary conditions and the grid are divided for the models, and unsteady state conduction equation without inner heat is discreted in three dimensional body fitted coordinates. Numerical calculation in different size models, the platform cooling temperature field is got and the production requirements could meet the unsteady state heat conduction time, and the results are analyzed and demonstrated.

Key words: cooling platform; unsteady state heat conduction; numerical study

1 模型描述

在某一工业生产中, 一块红热钢板放置在一冷却平台上, 冷却平台中有冷却孔, 孔中通水冷却, 钢板初始温度为 900°C , 要求温度降温到 200°C 以内。图 1 为结构示意图, 上部为红热钢板, 总热量为 Q , 下部为冷却平台, 在距离冷却平台表面 b 处加工一排直径为 D 的孔, 孔数量为 n , 孔间距为 a (非孔的中心距), 孔内通水冷却。推导公式时, 时间设为 t ; 钢板长度可自定, 设为 L ; 希望能得到水流速度 u 与 a 、 b 、 D 之间的关系公式。

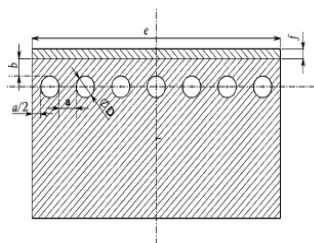


图 1 冷却平台及钢板尺寸示意图

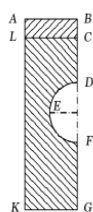


图 2 计算模块

该模型尺寸及工况如下: $e = 2\text{m}$, $f = 10\text{mm}$, $L = 1\text{m}$, $\mu = 15\text{mm}$, 其中 l 为 (管长), 此处假设 $l = L$; $w = a + D$; $d = D$; $H = b + D/2$, 冷却水速度 $u = 2\text{m/s}$, 环境温度

$T_{\text{en}} = 20^{\circ}\text{C}$ 。

雷诺数:

$$Re = \frac{ud}{\nu_f} \quad (1)$$

采用 Gnielinski 公式^[1]:

$$Nu = \frac{(f/8)(Re - 1000)Pr_f}{1 + 12.7\sqrt{f/8}(Pr_f^{2/3} - 1)} \left[1 + \left(\frac{d}{l} \right)^{2/3} \right] c_1 \quad (2)$$

对于液体: (此处介质为水):

$$c_1 = \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0.01} \quad (3)$$

其中:

$$f = (1.82 \lg Re - 1.64)^{-2} \quad (4)$$

换热系数为:

$$h = \lambda Nu / d = 1177.5 \quad (5)$$

2 冷却平台传热分析

根据模型温度分布对称性特点, 取图 2 的模块进行分析。显然该问题为一非稳态导热问题。控制方程和初边条件如下。

控制方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} \left(\frac{\lambda}{\rho c_p} \text{grad} T \right) \quad (6)$$

* 收稿日期: 2013-01-07

作者简介: 刘军强 (1984-) 男, 甘肃兰州人, 在读硕士, 研究方向: 强化化热。

式中: λ 为导热系数 ρ 为密度, c_p 定压比热容。

初始条件:

区域 A-B-C-L-A: $T=900^\circ\text{C}$

区域 C-D-E-F-G-K-L-C: $T=T_{\text{en}}$ (7)

边界条件:

在边界 A-B 上为辐射换热, 根据斯忒藩-玻尔兹曼定律, 辐射换热量 (假设辐射热量全部散失于周围环境, 不再返回, 且环境温度恒定) 通过查表可得, 具有光滑氧化层表皮钢板的发射率为: $\varepsilon=0.82$, 则有:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \varepsilon \sigma [(T_{\text{AB}} + 273.2)^4 - (T_{\text{en}} + 273.2)^4]$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \quad (8)$$

在边界 B-D, F-G, A-K 上, 根据温度分布的对称性, 则有:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

在边界 D-E-F 上, 是强制对流换热, 忽略轴向导热, 则有:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = h(T_w - T_f) \quad (10)$$

式中: h 为强制对流换热系数。

在边界 K-G 上为第一类边界条件:

$$T_{\text{GK}} = T_{\text{en}} \quad (11)$$

3 数值求解

应用显式格式求解, 且该问题无内热源, 在三维适体坐标下式 (6) 可转化为:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} = \frac{1}{J} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\Gamma \alpha}{J} \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\Gamma \beta}{J} \frac{\partial T}{\partial \eta} \right) + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\frac{\Gamma \gamma}{J} \frac{\partial T}{\partial \zeta} \right) \right] \quad (12)$$

其中: $\Gamma = \lambda / c_p$ 。

$$J = x_\xi y_\eta z_\zeta + x_\xi y_\zeta z_\eta + x_\eta y_\zeta z_\xi - x_\zeta y_\eta z_\xi - x_\xi y_\zeta z_\eta - x_\eta y_\xi z_\zeta \quad (13)$$

用有限容积法离散方程式 (12), 可得到三维非稳态无内热源导热七点格式, 上一时层温度值用 T^0 表示^[2-4], 即:

$$a_p T_p = a_E T_E^0 + a_W T_W^0 + a_N T_N^0 + a_S T_S^0 + a_B T_B^0 + a_T T_T + B \quad (14)$$

$$a_p = \frac{J(\rho c_p)_p \Delta \eta \Delta \xi \Delta \zeta}{\Delta t} \quad (15)$$

$$B = - \left(\frac{\Gamma}{J} \alpha T_\eta^0 \right)_w - \left(\frac{\Gamma}{J} \beta T_\xi^0 \right)_s - \left(\frac{\Gamma}{J} \gamma T_\zeta^0 \right)_b \quad (16)$$

根据模型尺寸, 取 $H=30\text{mm}$ 生成图 3 的三维网格, 图 4 是 $z=10\text{mm}$ 的二维截面网格。分别对 $H=30\text{mm}$ 、 40mm 、 50mm 、 60mm 、 70mm 尺寸数值计算出图 5 的温度场。

4 结果分析

对不同 H 尺寸模型的数值计算, 可得出钢板降温到 200°C 内的时间, 如图 6 所示。

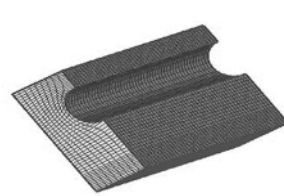


图 3 三维网格

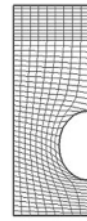


图 4 二维截面网格

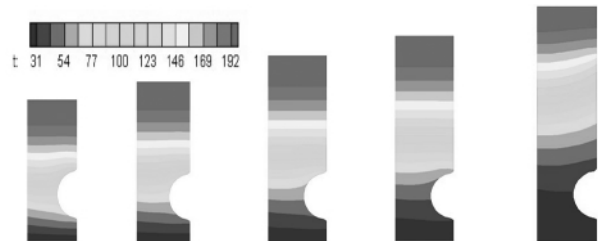


图 5 不同 H 尺寸的温度分布

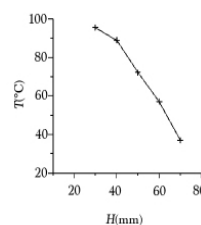


图 6 管壁最高温随 H 的变化规律

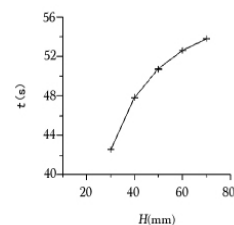


图 7 时间随 H 的变化规律

图 6 说明, 随着 H 的增加圆管壁面最高温降低, 且 H 最小时, 温度最高, 传热效果最为明显, 并低于汽化温度, 该 H 尺寸保证圆管内的水在强化传热过程的稳定性和效果。若 H 小于该尺寸, 管内流体则发生汽化, 无法保证传热系数 h 的有效性。

根据图 7 的相关数据, 可拟合出达到设计目标的时间 t 随尺寸 H 的关系式:

$$t = 13.26 \ln(H) - 1.79, H = b + D/2 \quad (17)$$

从图中可看出, 随着圆管中心至冷却平台顶端距离 H 的增加, 钢板冷却降至 200°C 的时间也增加。这是由于在钢板释放热量一定的前提下, 随 H 的增加, 冷却平台的蓄热量逐渐增多, 强化传热带走的热量减少。相应地, 热量从冷却平台顶端传递到圆管壁面的速率降低, 管壁附近的温度梯度减小, 从而导致圆管对流冷却能力削弱。从传热机理上讲, 在圆管流体中, 由于流体粘性, 速度梯度的存在, 强化对流要比导热的传热能力大得多, 在所传递热量一定的情形下, 对流传热能力削弱, 必然导致所需时间增加。

(下转第 52 页)

分布。由图9可看到在一定流量三种转速情况下,内机出口速度都有较大波动。由图10可看到,在低转速情况下,上壁面附近发生旋涡流动,而在中转速与高转速时在下壁面附近发生了严重的流动分离。

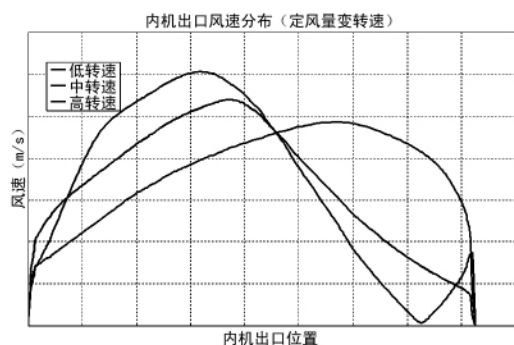


图9 内机出口风速分布



图10 定风量变转速时流场速度分布

图11、12所示在固定流量,分别选取贯流风机高、中、低转速时内机出口湍流强度分布与整个流场湍流强度分布。由图11、12可见在固定流量低转速和高转速情况下,湍流强度分布并不均匀,分别集中在下壁面和上壁面附近,加剧了流动状况的恶化。随着湍流强度的增大,能有效抑制流动分离的发生,能够使流动分离点和再附点位置向出口位置移动。

5 结论

(1) 对于固定转速下工作的贯流风机,风量过大,会使得出风道上表面区域产生旋涡流动;风量过小,会使得出风道下表面区域产生流动分离。因此,存在一最佳风量,可使得出风道的流场结构最佳,流动分离最少,由涡流造成的压力损失最小。

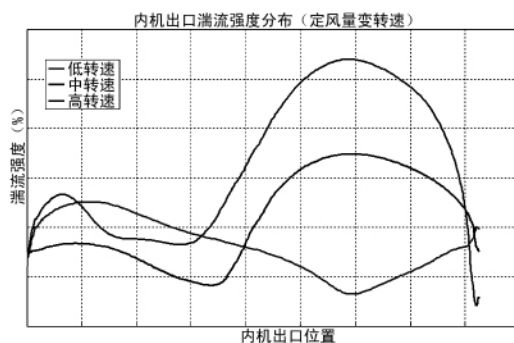


图11 内机出口湍流强度分布



图12 定风量变转速时湍流强度分布

(2) 对于固定风量下工作的贯流风机,转速过高,会使得出风道下表面区域产生流动分离;转速过低,会使得出风道上表面区域产生旋涡流动。因此,存在一最佳转速,可使得出风口流场结构最佳,流动分离最少,由涡流造成的压力损失最小。

参考文献:

- [1] 薛永飞. 分体空调室内机的双流体数值模拟[J]. 工程热物理学报 2007 28(2): 235-237.
- [2] 张师帅, 罗亮. 空调用贯流风机叶轮几何建模的参数化[J]. 风机技术 2006(5): 14-16.
- [3] 薛永飞, 任绍民, 车福亮. 空调室内机换热器的整体数值模拟[J]. 制冷 2009 28(2): 5-9.
- [4] 区颖达, 吴克启. 横流风机特性参数的实验研究及统计分析[J]. 流体机械 2000 28(12): 5-6.
- [5] Yang Cheng Shih, Hung Chi Hou, Hsuehneg Chiang. Numerical study of the similarity law for the cross flow fan of a split-type air conditioner[J]. 2004, Trans. ASHRAE, 110(II): 379-388.
- [6] Wu C J, Liu D P, Pan J. A study of the aerodynamic and acoustic performance of an door unit of a DC-inverter split air-conditioner[J]. Trans. ASHRAE 2012 73(4): 415-422.

(上接第49页)

参考文献:

- [1] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [2] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.

- [3] Richtmyer R D, Morton K W. Difference methods for initial problems. 2nd ed[M]. New York: Interscience publishers, 1967.
- [4] Freitas C J. Prospective: selected benchmarks from commercial CFD codes[J]. Fluids engineering, 1995(3): 127-131.