

(上海交通大学 材料科学与工程学院; 上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240)

**摘要:** 为了分析真空热处理炉内加热工件的温度场, 将包括工件在内的整个真空热处理炉作为模拟对象建立了一个三维的数值模型。该模型集成了一个控制炉温的 PD 模块, 并且考虑了热物性参数的非线性因素。基于一商业软件, 对工件、真空热处理炉的隔热层、加热管等的瞬态传热过程进行了数值模拟, 并与实测值进行了对比, 两者基本吻合。最后, 根据模拟结果提出了优化的加热工艺参数。

**关键词:** 数值模拟; 真空热处理炉; 温度场

**中图分类号:** TG155.1    **文献标识码:** A    **文章编号:** 0254-6051(2007)07-0051-04

### 3-D Numerical Simulation of Heat Transfer Process in Vacuum Heat Treatment Furnace

HAO Xiao-wei, ZHANG Weimin, CHEN Nai-lu, ZUO Xun-wei

(School of Materials Science and Engineering; Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In order to analyze the temperature field of workpieces in the vacuum heat treatment furnace, a 3-D numerical model taking the whole furnace and workpieces as one investigation object was developed. A PD module applied to control the furnace temperature was integrated and the nonlinear factors of the thermo-physical properties were taken into account. Aided by commercial software, the numerical simulation of the transient heat transfer process of workpieces, thermal insulation walls and heating tubes was performed. The comparison between numerical simulation results and experimental ones shows the two basically fit each other. And finally, the optimized technical parameters are proposed according to the simulated results.

**Key words:** numerical simulation; vacuum heat treatment furnace; temperature field

真空热处理炉内的传热以辐射为主, 在加热过程中炉膛比工件的升温速度快得多, 故存在加热滞后现象。此外, 由于工件之间相互遮蔽, 形成加热器无法直接辐射到的暗辐射区, 从而导致工件加热不均匀并产生温差<sup>[1]</sup>。因此, 为避免工件产生加热畸变, 同时又不致因为加热速度太慢而引起晶粒长大和成本增加, 需要研究真空炉内的传热规律, 制定合适的加热工艺。常规用于确定加热工艺参数的实测法成本高、周期长<sup>[2]</sup>。近年来, 计算机模拟技术开始用于热处理加热过程的研究<sup>[3]</sup>, 但采用的多是二维模型、工件简单, 而且忽略了炉子和工件内的温度梯度<sup>[2,4-6]</sup>。本文将工件和真空热处理炉作为一个整体来研究, 基于一商业的 CFD 软件建立了一种三维真空热处理炉瞬态温度场的数值模型, 该模型集成 PD 模块的三维真空热处理炉数值模型, 考虑了热物性参数的非线性因素, 对工

件加热过程中的瞬态温度场进行了模拟, 并根据模拟结果对工艺进行了优化。该模型可为真空热处理的生产提供参考依据。

## 1 试验方法

试验采用 VHQ-446HF 型高压气淬炉, 该炉子最大装炉量为 200 kg, 最高加热温度为 1320℃, 使用石墨加热管进行辐射加热。图 1 为炉子和工件的三维几何模型, 工件为 27 个  $\phi 32 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$  的钢棒。在工件的心部和次表面钻  $\phi 3.2 \text{ mm}$  的孔放置测试热电偶, 见图 2a。采用的初始加热工艺是以 10℃/min 的速度将工件从室温加热到 930℃ 并保温 60 min。根据模拟结果, 修改加热工艺, 再重新进行模拟和试验。模拟和试验中都设有 5 个监测点来监测工件和炉内的温度, 如图 2b 所示, T1 和 T2 分别指位于角上工件的心部和前端面中心, 同样 T3 和 T4 分别指位于中心工件的心部和端面中心。另外, TF 指控制热电偶的温度 (即炉温)。

## 2 真空热处理炉的数值模型

### 2.1 真空热处理炉建模

由于对称原因, 仅取真空热处理炉和工件的 1/4

**作者简介:** 郝晓伟 (1968-10-), 男, 河南洛阳人, 高级工程师, 博士生, 主要从事金属材料及其热处理过程的模拟研究, 发表论文 6 篇。联系电话: 021-34203743, 021-34203742 E-mail: haoxw@sjtu.edu.cn 或 xwhao123@yahoo.com.cn

**收稿日期:** 2007-02-20

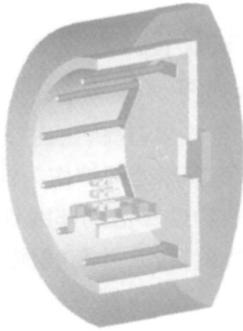


图 1 真空热处理炉几何模型

Fig. 1 Geometric model of the vacuum furnace

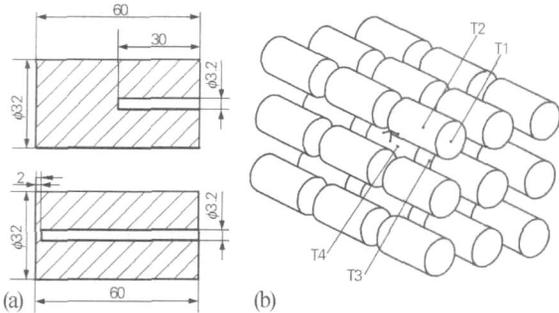


图 2 工件上的热电偶孔 (a)和工件内热电偶的监测位置 (b)

Fig. 2 Holes for thermocouples in workpieces (a)

and locations for thermocouples monitored in workpieces (b)

作为研究对象,建模时包括一只控制炉温的热电偶。工件采用六面体单元,其余为四面体单元,共约 410 000个计算单元。真空条件下几乎无气体存在,因而只需考虑表面间的辐射换热和固体内的热传导。采用商业的有限体积软件来求解包括辐射传热的能量方程系统。

## 2.2 能量方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) = \nabla \cdot (\rho \nabla T) + S_h \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为密度,  $H$  为热焓,  $t$  为时间,  $\rho \nabla T$  为热导率,  $T$  为温度,  $S_h$  为体积热源项。

## 2.3 辐射传热模型

计算中采用离散坐标 (DO) 辐射模型,基于对辐射强度的方向变化进行离散,通过求解覆盖整个  $4\pi$  立体角的一套离散方向上的辐射传递方程而得到问题的解。离散坐标法易于与流动和燃烧模型耦合求解,也常用于纯辐射问题的求解。其辐射传热方程<sup>[7]</sup>如下:

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \kappa_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = a n^2 \frac{T^4}{4\sigma_0} + \int_{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \kappa_s(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega \quad (2)$$

式中:  $\vec{r}$  为位置向量,  $\vec{s}$  为方向向量,  $\vec{s}'$  为散射方向,  $s'$  为行程长度,  $a$  为吸收系数,  $n$  为折射系数,  $\kappa_s$  为散射系

数, 为斯蒂芬 玻耳兹曼常数 ( $5.672 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ),  $I$  为辐射强度 (依赖于位置  $\vec{r}$  与方向  $\vec{s}$ ),  $T$  为当地温度,  $\kappa_s$  为相位函数,  $\Omega$  为空间立体角。

## 2.4 边界条件

在计算过程中,固体和气体交界壁面采用耦合边界条件,不需要输入任何附加的热边界信息,因为求解程序会直接从相邻单元的解中计算出传热情况。

水冷壁面采用温度边界条件,  $T|_s = \text{常数}$  (3)

对于加热管,除耦合边界外,在其内部还要加入由 PD 模块程序控制的体积热源项  $S_h$ 。

$$S_h = p_D P_F / V_h \quad (4)$$

式中  $p_D$  为 PD 程序给出的系数,  $P_F$  为热处理炉的功率,  $V_h$  为加热管的体积。

## 2.5 初始条件

所有气体和固体区域:  $T|_{t=0} = 293 \text{ K}$  (5)

## 2.6 PD 控制模块

体积热源项通过用户自定义函数加在加热管上, PD 控制模块的计算流程见图 3。

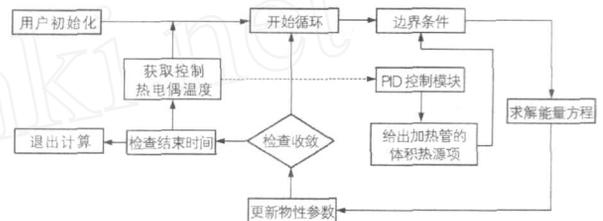


图 3 PD 控制流程图

Fig. 3 Flow chart of PD control module

## 2.7 热物理性能参数

各种材料的热物理性能参数见表 1。

表 1 各种材料的热物理性能参数<sup>[1,8]</sup>

Table 1 Thermo-physical properties of materials				
热物理性能参数	$\rho$ / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$C_p$ / $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	发射率	$\epsilon$ / $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$
隔热层	132	183.6 ~ 351.0	0.77	0.050 ~ 0.126
工件	7850	460 ~ 670	0.80	29 ~ 31
加热管	220	711 ~ 1674	0.95	131.9 ~ 54.4

## 3 结果与讨论

### 3.1 初始加热工艺的模拟结果

图 4 给出了初始加热工艺的模拟结果。由图 4a (加热 26 min 后整个炉子的温度分布云图) 可发现,加热管、工件、隔热层、料架以及控温热电偶之间存在较大的温度梯度;另外从图 4b (监测点温度随时间变化的曲线) 也可看出,在加热初期,炉温上升很快,而工件温度远落后于炉温。工件加热升温阶段,炉子 (TF) 和中心工件心部 (T4) 的最大温差接近 330 (见图 5a)。这说明在真空加热过程中存在明显的加热滞后

现象,其原因是一方面炉膛的隔热材料采用石墨毡,这类材料的热容量小,炉膛升温速度快;另一方面,炉内加热元件对工件的传热以辐射传热为主,低温时辐射加热效率很低。经过大约 120 min 后,所有工件心部和表面都达到与炉子一致的温度,加热滞后时间约为 30 min。由图 5b 所示的加热过程中不同工件之间以及同一工件不同部位之间的温差随时间的变化曲线可知,外部工件和中心工件存在很大的温差,这是由于外部工件被直接辐射,加热速度快,而中心工件被遮挡,无法被直接辐射到,加热速度慢,因此真空加热存在加热不均匀现象。然而,对于同一工件,无论其位于中心

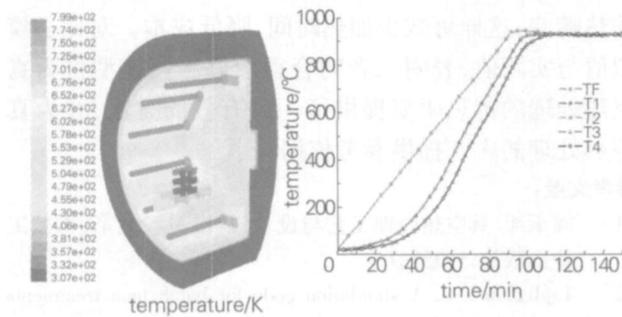


图 4 初始工艺的模拟结果

(a) 加热 26 min 温度云图 (b) 监测点温度随时间变化的曲线

Fig. 4 Simulated results for initial thermal schedule

(a) temperature contours after heating 26 min

(b) temperature curves of monitoring points with time

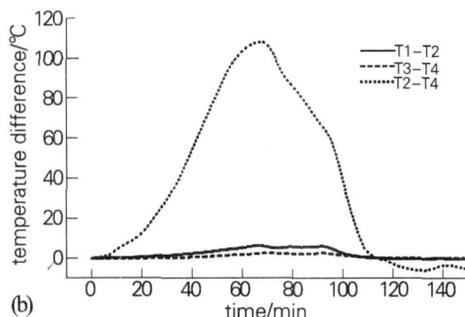
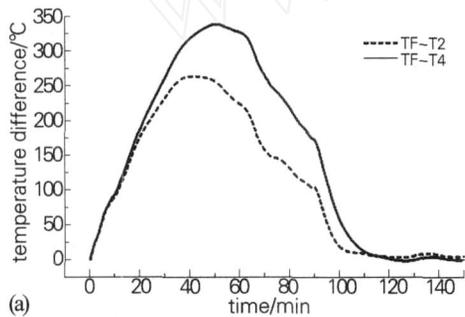


图 5 初始工艺的温差曲线

(a) 工件与炉子之间 (b) 工件不同监测点之间

Fig. 5 Temperature differences curves for initial thermal schedule

(a) between furnace and workpieces

(b) among different monitoring points of the workpieces

还是位于外部,其表面和心部的温差都很小,这与炉温升温速度较慢有关。

### 3.2 加热工艺的改进及模拟结果

从以上分析可知,即使在较慢的加热速度下,加热过程中仍存在较明显的加热滞后和加热不均匀现象。但是,对同一工件其心部与表面的温差极小,不会引起热畸变。为了缩短加热时间,减少能源消耗,提出以最快的速度(100 kW 的满功率)将工件加热到 930 ,并保温 30 min,然后再对此工艺进行数值模拟。

改进加热工艺条件下,加热 26 min 后炉子的温度分布云图和监测点温度随时间的变化曲线如图 6 所示。由图 6 可知,同一时刻改进工艺下的工件温度远高于初始工艺下的工件温度,仅需 30 min 炉温即达到 930 。由于加热速度大大提高,工件与炉子的最大温差几乎达到 530 (见图 7a),加热滞后现象更加突出。同时,外部工件与中心工件之间的温差也明显增大;从图 7b 可发现,对同一工件,其心部与表面温差也随加热速度的增大而增大,外部工件温差接近 15 ,而中心工件温差为 7 。文献 [1] 指出,对于有效厚度 <50 mm 的工件,加热时表面和心部最大温差 <50 ,可以认为不会因热应力而导致畸变。所以,工艺改进后工件的最大温差较小,不足以引起工件的加热畸变。此外,在工艺改进后,工件的加热滞后时间也缩短到约 13 min。

以上分析表明,对上述装炉量不是很大、工件尺寸比较小且摆放整齐的情况下,可以采用快速的加热工艺。这样可以缩短加热时间近 1 h。

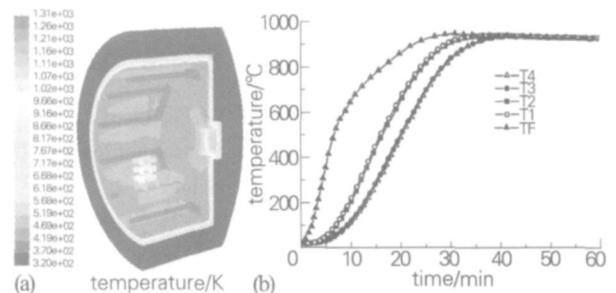


图 6 改进工艺后的模拟结果

(a) 加热 26 min 温度云图 (b) 监测点随时间变化的温度曲线

Fig. 6 Simulated results for improved thermal schedule

(a) temperature contours after heating 26 min

(b) temperature curves of monitoring points with time

### 3.3 模拟结果与试验结果的对比

图 8 是改进加热工艺后的模拟结果与实测值的对比曲线。由图 8 可知,模拟的炉温随时间的变化曲线与实测值非常接近,说明 PD 控制模块能够很好地反映炉子的实际升温情况;在低温阶段,模拟的工件心部

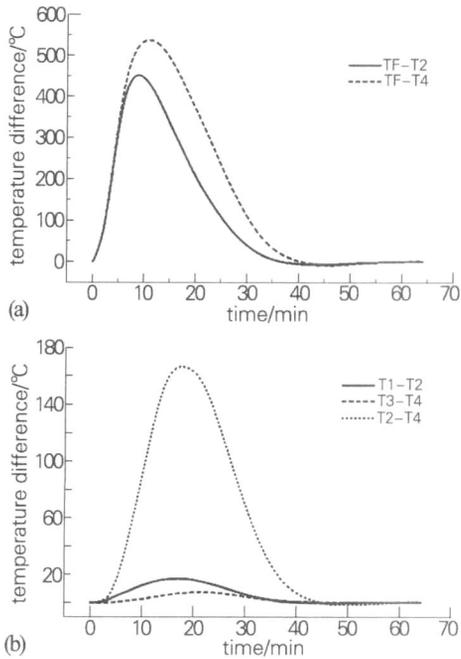


图 7 改进工艺的温差曲线  
(a) 工件与炉子之间 (b) 工件不同监测点之间  
Fig. 7 Temperature differences curves for improved thermal schedule

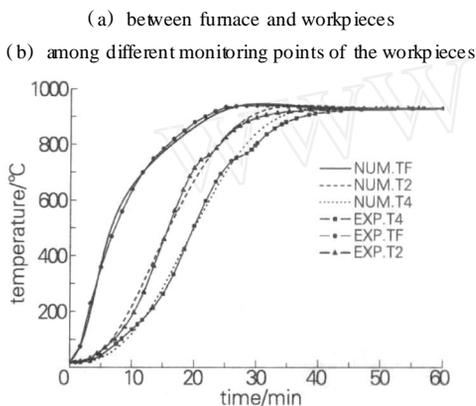


图 8 改进工艺的模拟结果与实测值对比  
Fig. 8 Comparison of simulated and measured results for improved thermal schedule

温度变化趋势也与实测值符合得较好,当温度高于 700 时,模拟值高于实测值,这些偏差可能是由于未

考虑工件加热过程中奥氏体化时的吸热所致。总之,该三维数值模型是可行的,可以较准确地预测真空热处理炉内的传热过程,能够为真空热处理设备设计以及工艺的制定和改进提供参考依据。

#### 4 结语

建立了一种包涵 PD 控温模块的三维的真空热处理炉瞬态传热的数值模型,利用该模型对真空热处理炉内棒形工件的真空加热过程进行了数值模拟分析,根据数值模拟结果提出了加热工艺的改进意见。结果表明,对装炉量不是很大且有序放置的小工件进行真空热处理时,可以采用快速加热工艺而不会引起工件的热畸变,这样可减少加热时间,降低成本。对比了模拟值与实测值,表明二者吻合得较好。该模型可为真空热处理的传热研究提供了一种有效的方法,并为真空热处理的生产提供参考依据。

#### 参考文献:

- [1] 阎承沛. 真空热处理工艺与设备设计 [M]. 北京:机械工业出版社, 1998: 27.
- [2] Tagliafico L A. A simulation code for batch heat treatments [J]. International Journal of Thermal Science, 2004, 43: 509-517.
- [3] Funatani K Modeling and simulation technology for the advancement of materials processing technology [J]. Journal De Physique IV, 2004, 120 (12): 737-742.
- [4] Fan Y H. Transient heat transfer in batch thermal reactors for silicon wafer processing [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41 (11): 1549-1557.
- [5] Kang J. Numerical simulation of heat transfer in loaded heat treatment furnaces [J]. Journal De Physique IV, 2004, 120 (12): 545-553.
- [6] Mochida A. Transient heat transfer analysis in vacuum furnaces heated by radiant tube burners [J]. Energy Convers Mgmt, 1997, 38 (10-13): 1169-1176.
- [7] 屠传经,等. 高温传热学 [M]. 杭州:浙江大学出版社, 1997: 283.
- [8] 达道安. 真空设计手册 [M]. 北京:国防工业出版社, 2004: 954.

### 《金属热处理》2005年总被引频次创历年新高

据中国科技信息研究所研制并于 2006年 10月由科学文献出版社公开出版的《2006年版中国科技期刊引证报告(核心版)》(简称 CJCR-2006)中公布的统计数据表明,继续入选为该所 2005年 1652种统计源期刊的《金属热处理》在当年的总被引频次为 668次。与往年相比,这一指标值已创历年新高,并较 2004年的 616次增加了 8.4个百分点,说明该刊一年来的编辑质量和学术水平有所提高。自 1997年以来,该刊被 CJCR 每年统计并公布的总被引频次依次为 317、301、340、386、459、530、553、616及 668。科技期刊的总被引频次可以显示该刊被使用和受重视的程度,因而是衡量刊物的实际使用量,评价其质量和水平,选择核心期刊和文献数据库来源期刊的一项重要指标。(西南交通大学 范文田供稿)