第 34 卷 第 9 期
2009 年 9 月

金属热处理
HEAT TREATMENT OF METALS

Vol. 34 No. 9
September 2009

计算机应用

低压转子加热过程温度场与相变的计算机模拟

雷 雪,徐薇平,韩利战,顾剑锋,潘健生

(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:利用有限元数值方法模拟了 30Cr2Ni4MoV 钢低压转子的典型加热工艺过程,分析了加热过程中的转子关键位置处升温曲线、奥氏体化进程,以及关键截面上的温差分布。通过简略的热应力估算对加热过程中出现的温差进行了评估,为进一步优化加热工艺提供了依据。

关键词:计算机模拟;低压转子;奥氏体化;温度场;相变;热应力

中图分类号:O242 **文献标识码**:A **文章编号**:0254-6051(2009)09-

Computer simulation on temperature field and phase transformation in the low-pressure rotor during heating process

LEI Xue, XU Wei-ping, HAN Li-zhan, GU Jian-feng, PAN Jian-sheng

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

Abstract: The FEM numerical simulation was carried out for the 30Cr2Ni4MoV steel low-pressure rotor based on a typical heating process. The heat treatment process curves, temperature difference and austenization process on some key points and sections of the rotor were analyzed. The temperature difference during heating process was evaluated based on the simple simplified calculation of the thermal stress, providing fundamental information for the further process optimization.

Key words: computer simulation; low-pressure rotor; austenization; temperature field; phase transformation; thermal stress

汽轮机转子是电站设备中最重要的零件之一,其中低压转子具有体积大,自重大,而且在工作过程中要承受高速旋转产生的离心力、承受传递扭矩和自重产生的弯曲应力,承受热应力等复杂应力,其选材和热加工都有很高的要求。30Cr2Ni4MoV 钢是常用低压转子材料,具有淬透性高、综合力学性能好、热加工性能好等特点,符合低压转子要求。由于要求低压转子具有高强度、塑性、韧性,力学性能均匀,残余应力小等特征,而当奥氏体晶粒度为 3 ~ 4 级,且淬火组织为马氏体时,钢的脆性转变温度最低,综合性能最好[1-3],因此低压转子的性能通常要求热处理后得到完全的马氏体淬火组织。低压转子调质淬火前必须加热完全奥氏体化。由于低压转子体积大,截面厚,在加热过程中获得均匀的奥氏体晶粒的同时既要尽量降低表心温差以减小热应力,又要在钢件完全奥氏体化后避免长时间在高温停留,防止奥氏体晶粒的粗大。

计算机数值模拟技术综合传热学、奥氏体化相变动力学等理论,运用有限元方法可得到热处理过程任一瞬时工件内部温度场分布和组织分布[4-7]。因此根据具体工艺条件,如工件形状、材料种类、加热介质等多种因素,能够实现加热过程的精确模拟。本文模拟了 30Cr2Ni4MoV 钢低压转子典型加热过程中的温度场和相变过程,并对可能导致的热应力进行了简单估算,最后对此加热工艺做了较全面的分析和评估。

1 加热奥氏体化过程的数学模型

1.1 含相变潜热的非线性瞬态温度场方程和边界条件

考虑相变潜热的二维非线性瞬态导热偏微分方程在直角坐标下的形式为:

$$k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right)+\dot{Q}=\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t} \tag{1}$$

式中 T 为温度,t 为时间,k、C_p、ρ 分别为材料导热系数、比热容和密度,均为温度的函数,$\dot{Q}$ 为相变潜热。

在求解瞬态温度场时,需要相应的初始条件和边界条件。初始条件是指所求解的非稳态传热问题在初始时刻区域中各点温度,它可以是常值,也可以是空间坐标的函数,如下式。

$$T|_{t=0}=T_0 \text{ 或 } T|_{t=0}=T_0(x,y,z) \tag{2}$$

收稿日期:2009-02-18

基金项目:上海市科委重大科技攻关项目(08DZ1100302)

作者简介:雷 雪(1985—),女,湖北天门人,硕士研究生,主要研究方向:热处理数值模拟。联系人:顾剑锋 E-mail:gujf@sjtu.edu.cn

T_0 为已知常数,若物体初温是不均匀的,则 T_0 表示已知函数。

常用的换热边界条件为:

$$k\frac{\partial T}{\partial t}\Big|_{\Gamma} = h_{\Sigma}(T_c - T_w) \tag{3}$$

$$h_{\Sigma} = h_C + h_R \tag{4}$$

h_{Σ} 分别为边界 Γ 上的综合换热系数,其中,h_C 为对流换热系数,h_R 为辐射换热系数,T_c 为环境温度,T_w 为工件与环境接触边界上的温度。

通常情况下加热过程较为缓慢,表面换热与工件的尺寸、炉膛温度、工件和炉膛的辐射率等有关,可以按对流换热和辐射换热直接计算表面的换热系数,计算方法可参考文献[8]。(1)式中的内热源项 $\dot{Q}$ 来自奥氏体化产生的相变潜热,其对温度场分布影响较大,不能忽略。

相变潜热可由下式进行计算:

$$\dot{Q} = \Delta H \cdot \frac{\Delta f}{\Delta t} \tag{5}$$

式中 ΔH 为生成单位体积奥氏体时吸收的热量,取平均值 $-6.0\times10^8\ \mathrm{J/m^3}$,$\Delta f$ 为 Δt 时间内的组织转变量,即新形成的奥氏体体积分数。显然,单位时间内吸收的潜热 $\dot{Q}$ 与单位时间内奥氏体的生成量成正比。

1.2　奥氏体化进程的相变量计算模型

奥氏体化过程是一个扩散型转变,伴随着潜热的吸收及体积收缩,影响工件内温度场的分布,因此组织转变量的计算在温度场模拟中不可缺少。通常将连续加热的奥氏体化过程可分解成为若干个微小时间段的等温过程。当温度上升达到 Ac_1 点以后,开始计算奥氏体化孕育期,并进行累加。孕育期累加达到 1 时,开始计算奥氏体生成量;累加值小于 1,则继续进行孕育期累加。

孕育期累加法则[8]用来判断相变是否开始发生,其数学表达如下。

$$\sum_{i=1}^{n} = \frac{\Delta t_i}{\tau_{iTTA}} = 1 \tag{6}$$

式中 Δt_i 是微小等温时间段,τ_{iTTA} 为在某一固定温度 T_i 下完全奥氏体化所需的时间。

对于扩散型转变,转变量的计算通常利用 Avrami 等提出的转变量 - 时间($V-t$)公式[9]:

$$V = 1 - \exp(-bt^n) \tag{7}$$

式中 V 为奥氏体生成体积分数,t 为等温时间,b 和 n 是随温度变化的相变动力学有关的参数,可通过 TTT 曲线求得。

2　有限元模拟方法及输入数据

2.1　有限元模拟及网格

图 1 为低压转子尺寸示意图,直径最大处 ϕ1 855 mm,轴向长达 8 608 mm,质量达 99.25 t。因为轴对称的规则形状,在有限元分析中采用二维四节点轴对称单元,并且根据从表面到心部的不同位置划分大小不同的单元。有限元模拟的实现是在有限元分析软件 MSC. MARC 基础上结合自主开发的相变分析程序进行的。

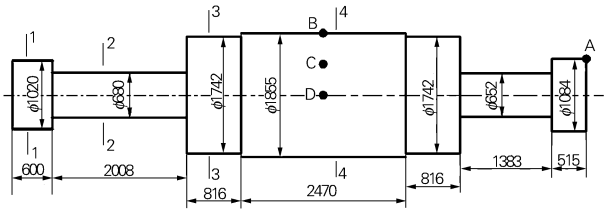

图 1　低压转子的形状和几何尺寸

Fig. 1　Geometry and Ddimension of low-pressure rotor

2.2　加热工艺和边界条件处理

大件加热通常采用阶梯加热来减小加热过程中产生的温差,并且各阶段升温速度都比较小。本文模拟的低压转子加热工艺如图 2 所示。

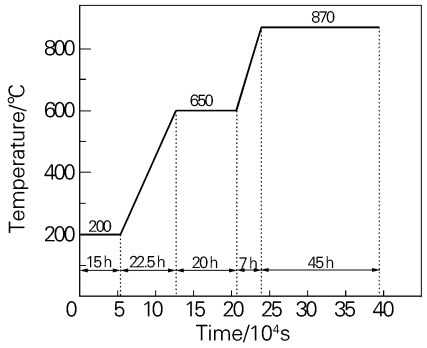

图 2　低压转子加热工艺曲线

Fig. 2　Heating process curve of low-pressure rotor

低压转子加热采用井式电炉吊挂加热,初始温度即进炉前温度设为 25 ℃。工件加热过程中环境温度(炉温)根据设定的加热工艺方案变化,而换热边界条件采用第三类边界条件,包括转子与炉内气体的对流和辐射,使用如下经验公式。

圆周表面换热系数:$h = 2.56(T_w - T_c)^{0.25} + 4.6\times10^{-8}(T_w^2 + T_c^2)(T_w + T_c)$　　(8)

端部表面换热系数:$h = 3.26(T_w - T_c)^{0.25} + 4.6\times10^{-8}(T_w^2 + T_c^2)(T_w + T_c)$　　(9)

2.3　输入材料数据

低压转子材料为 30Cr2Ni4MoV 钢,其导热系数 K 和比热容 C_p 均为温度的函数,本文模拟中采用类似钢种 30Cr 的数据[10],见表 1 和表 2。

表1 30Cr钢导热系数与温度的关系

Table 1 Heat conduction coefficient vs. temperature in 30Cr steel

T/℃	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000
K/W·(m·℃)$^{-1}$	38.49	36.65	35.11	34.00	32.54	30.12	25.20	21.17	23.67	22.92

表2 30Cr钢比热与温度的关系

Table 2 Specific heat vs. temperature in 30Cr steel

T/℃	20	100	200	300	400	500	600	700	765	800	900	1 000
C_p/J·(kg·℃)$^{-1}$	468	478	512	549	596	656	738	845	1 054	775	657	646

模拟中所使用的奥氏体化等温转变曲线为使用Gleeble3500热模拟试验机测定的连续加热奥氏体化转变曲线,通过一定的数学处理获得的等温奥氏体转变曲线[11-13],如图3所示。

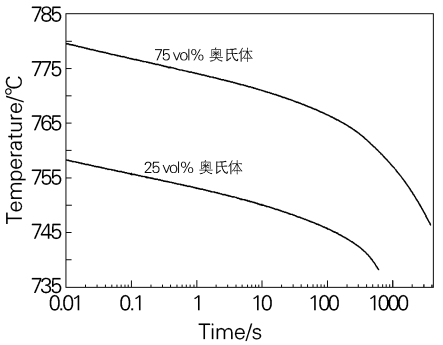

图3 30Cr2Ni4MoV钢等温奥氏体化曲线

Fig. 3 TTA curve of 30Cr2Ni4MoV steel

3 模拟结果和讨论

图4为转子几个典型位置点和炉温的升温曲线。由图4可以看出转子表面以及角点上温度随着炉温迅速升高,而内部温度尤其是最大截面的心部温度则上升较慢。例如,A点、最大截面表面B点和心部D点达到650 ℃平台温度时间分别为57.5、58.3和66.3 h,A点、最大截面表面B点到达870 ℃平台温度的时间分别为77.5 h和82.2 h,而最大截面心部D点到加热109.5 h结束时温度仅为854 ℃。可见转子表面和心部在加热过程中的温度延迟非常大,并且保温时间选为45 h稍有不足。

图5为转子在4个不同截面处加热过程中的表面和心部温差。可以看出,在整个加热过程中各个截面的表心出现了两次最大温差,这是由于加热采用阶梯加热所致。此外,截面尺寸越大,温差也越大,显然危险截面应该是最大截面。对于最大截面来说,第一次最大温差出现在中间保温平台开始处,此时表心温度分别为532和350 ℃,都低于600 ℃;而第二次最大温差出现在表心温度分别823和637 ℃时刻。可以认为第一次温差易引起转子内新微裂纹的产生和原有裂纹的扩展,因为前者温度较低,而后者温度高,已经处于相对软化状态,对温差引起的热应力有松弛作用。

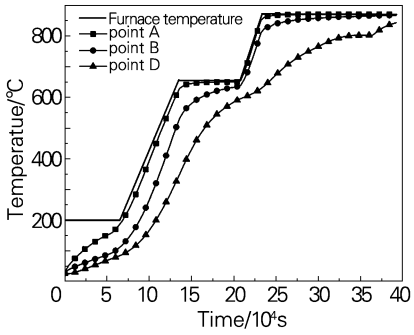

图4 转子不同位置点的升温曲线

Fig. 4 Heating curves of the rotor at some points

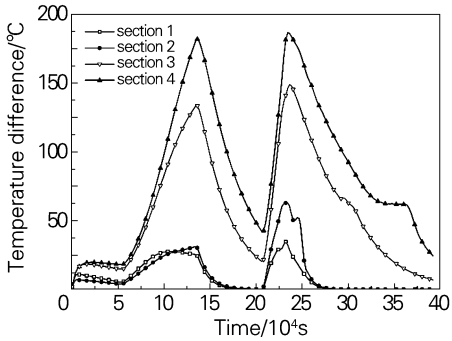

图5 转子加热过程中不同截面处表的心温差

Fig. 5 Temperature difference of the rotor at different sections

大件在加热过程中因截面厚、尺寸大等原因,易在加热过程中产生较大温差。对于具体工件温差究竟应控制在什么范围内合适,迄今为止没有明确的结论。本文根据转子加热过程中出现的温差,针对出现最大温差的危险截面粗略地估算其引起的热应力。首先,可获得最大截面在第一次最大温差出现时温度分布(见图6(a),可拟合为:

$$\Delta T = 208r^2 + 350 \tag{8}$$

文献[3]中给出了圆柱形工件在弹性状态下的热应力计算公式:

$$\sigma_r = \frac{E}{1-v}\left(\frac{J_R}{R^2} - \frac{J}{r^2}\right) \tag{9}$$

$$\sigma_t = \frac{E}{1-v}\left(\frac{J_R}{R^2} - \frac{J}{r^2} - w\right) \quad (10)$$

$$\sigma_0 = \frac{E}{1-v}\left(2\frac{J_R}{R^2} - w\right) \quad (11)$$

$$J_r = \int_0^r wrdr \quad (12)$$

$$J_r = \int_0^R wrdr \quad (13)$$

式中 w 为不均匀函数,$w = \alpha \cdot \Delta T$。$\sigma_r$、$\sigma_t$、$\sigma_0$ 分别为半径 r 处的径向、切向和轴向应力,E 为材料弹性模量,取为 200 GPa,v 为材料泊松比,α 材料线膨胀系数,取 $\alpha = 14 \times 10^{-6}/℃$。

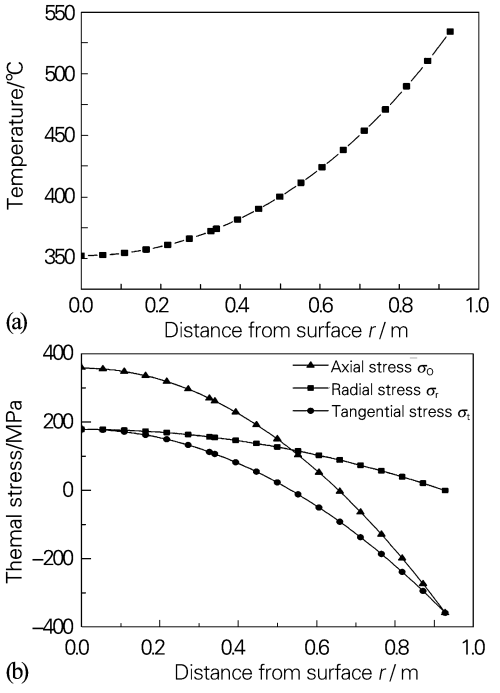

图 6　转子最大截面第一次最大温差出现时的温度分布和应力分布

(a)径向温度分布;(b)径向应力分布

Fig. 6　Distribution of temperature and stress along the rotor at the biggest section when the first maximum temperature difference occurs

(a) radial temperature profile; (b) radial stress profile

计算得到最大截面上温差最大时刻三向应力的分布如图 6(b)。由图 6(b)可知,此刻温差产生热应力使得转子心部受到三向拉应力作用,其中轴向拉应力最大,达到 357.9 MPa。表面则主要受到轴向和切向压应力,径向应力很小。由于汽轮机低压转子一般要求其屈服应力在 690 ~ 820 MPa 之间,断裂应力约为 830 MPa,因此,可认为该范围内的温差不会导致转子开裂。

通过模拟还可以直观显示转子内部各个位置的奥氏体分布和奥氏体化过程。奥氏体转变从工件端部和表面开始,逐步向工件心部推进。从几个特殊点的奥氏体化曲线可以发现,角点 A(图 1)在大约 63.4 h 最先开始奥氏体转变,最大截面表面 B 点处 64.7 h 开始奥氏体化,而心部 D 点(图 1)处在加热 101.8 h 后最后开始转变,约 102.5 h 后全部奥氏体化结束。

4　结论

1)由于低压转子件截面大,加热过程中即使采用较慢的加热速度,仍会产生较大温差。表面与心部之间出现两次最大温差,其中在最大截面上温差达到 180 ℃左右。经过第二个加热平台的 45 h 保温,最终可得到较均匀的温度分布。

2)低压转子奥氏体化在一定温度范围内进行,且不同部位开始奥氏体化的时间不同,表心由于温差较大,开始奥氏体转变的时间差别较大,转子全部奥氏体化结束时间为 102.5 h。心部在加热结束后仍与表面存在一定温差,因此原加热工艺应适当延长保温时间。

3)低压转子在最大截面上出现最大温差时导致的应力远小于材料性能强度,温差引起的热应力仍在容许范围内。

参考文献:

[1] 康大韬,叶国斌. 大型锻件材料及热处理[M]. 北京:龙门书局,1998.

[2] 孙福民,徐　涛,王年臣,等. 汽轮机热加工技术手册[M]. 哈尔滨:哈尔滨汽轮机厂有限责任公司,2006.

[3] 东北重型机械学院. 大锻件热处理[M]. 北京:机械工业出版社,1974.

[4] Reti T, Felde I, Horvath L. Quenchant performance analysis using computer simulation[J]. Heat Treatment of Metals, 1996(1): 11-14.

[5] William D Disler. Using on-line predictive computer modeling to optimize heat treat processing[J] Industrial Heating, 1996(9): 51-56.

[6] Inoue T, Arimoto K, Implementation of program for simulating heat treatment processes and some results[J]. Industrial Heating, 1995(4): 41-45.

[7] 顾剑锋,潘建生,胡明娟. 淬火过程的计算机模拟及其应用[J]. 金属热处理,2000,25(1):起止页码? 35-37;44.

[8] 刘　庄,吴肇基,吴景之,等. 热处理过程的数值模拟[M]. 北京:科学技术出版社,1996.

[9] 顾剑锋. 淬火应力场的模拟的研究与表面换热系数的测算[D]. 上海:上海交通大学,1999.

[10] 谭　真. 工程合金热物性[M]. 北京:冶金工业出版社,1994.

[11] 林慧国,傅代直. 钢的奥氏体转变曲线—原理、测试和应用[M]. 北京:机械工业出版社,1988.

[12] Liu F, Yang C, Yang G, et al. Additivity rule, isothermal and non-isothermal transformations on the basis of an analytical transformation model [J]. Acta Materialia, 2007, 55(15): 5255-5267.

[13] Rios P R. Relationship between non-isothermal transformation curves and isothermal and non-isothermal kinetics [J]. Acta Materialia, 2005, 53(18): 4893-4901.