

淬火过程中具有非线性表面系数考虑 相变时温度场的有限元分析*

程赫明^① 张曙红^① 王洪纲^① 李剑云^①

(1996 年 11 月 4 日收到)

摘 要

温度场的计算对淬火过程中热应力和热应变的分析有较大影响,对淬火后试件的残余应力和微观结构分析也有较大影响。本文以 42CrMo 钢圆柱体试件为研究对象,从相变等温动力学 TTT 图,给出了连续冷却相变动力学 CCT 图的数学模拟计算式,计算了钢淬火过程中相变组织成分百分比,将热物性系数处理为温度和相变体积百分比的函数,用有限单元法计算了淬火过程中具有非线性表面系数考虑相变时的温度场。并建立了相应的泛函,为以后计算淬火的热应力和热应变做好准备工作。

关键词 有限元法 淬火 热传导 相变

§ 1. 引 言

众所周知,淬火技术能改善金属材料的力学性能。温度场对淬火后的残余应力和微观结构有较大影响。因此,淬火过程中温度场的计算成为许多研究的主题内容。在过去的研究中,表面换热系数通常被处理为常数,事实上,表面热交换系数是表面温度的非线性函数。这给淬火过程的温度场计算带来较大的误差。A. Majorek 等人^[1]首次将表面换热系数视为温度的线性函数,这一方法大大的改进了淬火温度的计算精度。文献[2]利用有限差分法、非线性估计法和由实验确定的温度-时间关系,求解热传导问题的逆问题,从而得到非线性表面热交换系数(见图 2)。

本文以 42CrMo 钢圆柱体试件为例,从相变等温动力学 TTT 图,给出了连续冷却相变动力学 CCT 图的数学模拟计算式,计算了钢淬火过程中相变组织成分百分比,将热物性系数处理为温度和相变体积百分比的函数,以文献[2]所得到的非线性热表面交换系数为基础,用有限单元法计算了淬火中的温度场。并建立了相应的泛函。

§ 2. 淬火过程中的表面热交换系数

在淬火过程中,表面热交换系数不仅依赖于试件的表面加工质量,形状和淬火液,而且与

* 云南省学术和技术带头人培养经费和应用基础研究基金资助项目

① 昆明理工大学,昆明 650093

表面温度有关。为此,这一性质随温度的变化情况成为了人们关注的焦点。研究表明,它极敏感于实验条件,实验条件的微小变化将引起实测值发生相当大的误差。为了今后确定热应力和热应变,必须找到一种能有效地得到表面热交换系数的方法。R. F. Prince 和 A. J. Fletcher(1980)^[4]给出了一种能利用实验确定的时间-温度曲线和数值计算相结合,确定平板淬火中表面热交换系数的方法。但是,大多数研究尚未考虑到金属相变对表面换热系数的影响。文献[2]利用显示有限差分、非线性估计法和由热电偶测试而得到的温度-时间关系,求解热传导方程的逆问题,得出了表面热系数与温度间的非线性关系。这种方法具有收敛速度快、能用于各种不同的液、不受试件表面加工质量的限制,且利用了温度检测技术较为成熟稳定这一特点。图1表示由热电偶测量得到的时间-温度曲线,图1中 r 为半径, $r=0$ 对应圆柱体轴线, $r=9\text{mm}$ 对应于距圆柱体轴线 9mm 的位置。图2表示温度与表面热交换系数之间的关系。从图2中可以看出:(1)在淬火的初始阶段,冷却缓慢,此时,试件表面形成蒸汽膜,也就是蒸汽膜阶段。由于蒸汽膜的热阻较大,导热性能差,阻碍了试件与淬火液之间的热量交换,因此,表面换热系数值较小;(2)随淬火时间增长,蒸汽膜逐渐破裂。从温度随时间变化的曲线上看,冷却速率逐渐增高,这表时试件与淬火液间的换热逐渐激烈,因此,表面换热系数急剧增大。蒸气膜破坏后,表面换热系数在温度 $200^{\circ}\text{C}\sim 450^{\circ}\text{C}$ 范围内出现最大值,表面换热系数的最大值为 $0.0156\text{W}/\text{mm}^2\text{K}$,与实验所得到的 $0.0151\text{W}/\text{mm}^2\text{K}$ 比较^[8],结果非常接近。(3)值得注意的是,由于马氏体相变的缘故,在温度 $350^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}$ 之间,表面换热系数发生了突变。

在淬火过热沸腾换热机理尚不清楚表面换热系数测试技术尚不成熟的情况下,采用文献[2]所提出的方法能定性得到表面换热系数随表面温度变化的全部情况,且温度测试技术和数值计算方法均较为简单、稳定,为今后更精确地计算淬火过程中热应力、热应变和残余应力,做好了必要的准备工作;也为人们今后分析淬火冷却速率和表面换热系数对微观结构的影响,提供了必要的手段。

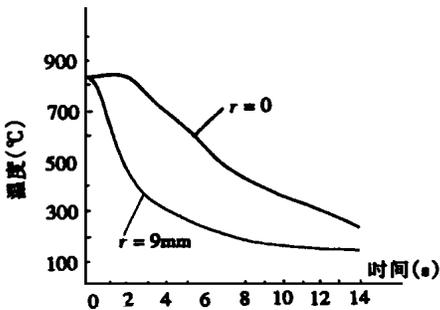


图1 淬火中温度与时间关系的实测值

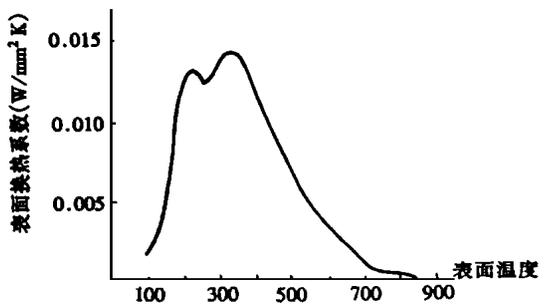


图2 表面换热系数随表面温度变化的关系

§ 3. 连续冷却的数学模型

过去的许多研究涉及到淬火过程中金属及合金微观结构的估算,至今为止,尚不能用纯理

论公式计算变组织成分百分比^[5]。通常人们将温度-时间曲线离散为一系列等温步长。在每一个等温步长中,新相形成的体积百分比用等温相变动力学来计算。珠光体和贝氏体的等温相变体积百分比按 Johnson-Mehl 所提出的公式

$$\phi_k = 1 - \exp(-bt^n) \tag{3.1}$$

计算,其中 b_k 和 n_k 由等温相变图的实验数据确定^[3]; $k=1$ 对应珠光体, $k=2$ 对应贝氏体。 b_k 和 n_k 由下列公式确定^{[3]、[4]}

$$\lg b = C_{0k} + C_{1k}T + C_{2k}T^2 + C_{3k}T^3 \tag{3.2}$$

$$n = D_{0k} + D_{1k}T + D_{2k}T^2 + D_{3k}T^3 \tag{3.3}$$

常数 C_{jk} 和 D_{jk} 由 42CrMo 钢的 TTT 图和非线性拟合法确定,其中 $j=0, 1, 2, 3$ 。常数 C_{jk} 和 D_{jk} 列入表 1 中

表 1 常数 C_{jk} 和 D_{jk} 的值

C_{jk}/D_{jk}	C_{0k}	C_{1k}	C_{2k}	C_{3k}	D_{0k}	D_{1k}	D_{2k}	D_{3k}
$k=1$	-0.3283 $\times 10^3$	0.1520 $\times 10^1$	-0.2348 $\times 10^{-2}$	0.1200 $\times 10^{-5}$	0.1472 $\times 10^3$	-0.6256 $\times 10^1$	0.9245 $\times 10^{-3}$	-0.4691 $\times 10^{-6}$
$k=2$	-0.6358 $\times 10^1$	0.1854 $\times 10^{-1}$	-0.2420 $\times 10^{-4}$	0.0	-0.2193 $\times 10^2$	0.1102 $\times 10^0$	-0.1216 $\times 10^{-3}$	0.0

至此,我们已得到了珠光体和贝氏体的等温相变体积百分比计算的数学模型,为了利用式(3.1)计算连续冷却过程中的相变组织成份百分比,我们采用 I. T zitelkov 所提出的模型,并用阶梯函数的数学变换^[6],即将温度-时间曲线离散为若干等温步长,在每一个等温步长内,用等温相变动力学计算其组织成份百分比,连续冷却过程的时间变换按下式计算

$$\tau^* = \left[\frac{\lg(1 - \phi_m)}{-b_k T_{m+1}} \right]^{\frac{1}{n_k T_{m+1}}} \tag{3.4}$$

这样连续冷却过程中珠光体和贝氏体相变组织成分百分比可按下式计算

$$\phi_k = 1 - \exp[-b_k(\tau^* + \Delta t)^{n_k}] \tag{3.5}$$

马氏体的体百分比采用下式计算

$$\phi_M = (1 - \phi_1 - \phi_2) \left[1 - \left(\frac{T - M_f}{M_s - T} \right)^{2.5} \right] \tag{3.6}$$

式中, M_f 和 M_s 分别表示马氏体相变的终了温度和初始温度。

§ 4. 温度场的泛函和有限元基本方程

试件为 42CrMo 钢制成的 $\phi 20\text{mm} \times 60\text{mm}$ 圆柱体,将试件加热至 850°C ,放入 20°C 的水中。该问题是一个典型的轴对称问题。热传导方程为:

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \lambda \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} \tag{4.1}$$

对应的对流换热边界条件为:

$$\frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = h(T)(T_a - T_\infty) \tag{4.2}$$

式中, $h(T)$ 的为表面换热系数,是表面温度的函数,可由有限差分法、非线性估计法和由实验

确定的时间-温度关系确定^[2]。 T_a 和 T_∞ 分别表示试件的表面温度和淬火液的温度。上述问题对应的泛函为:

$$K_n = - \int_{n-1}^n \int_{\Omega} \left\{ \frac{\lambda}{2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] + \rho C_V \right\} d\Omega dt + \int_{n-1}^n \int_{\Gamma} h(T_{n-1}) \left(\frac{T^2}{2} - T \right) ds dt \quad (4.3)$$

其中, $h(T_{n-1})$ 为 t_{n-1} 时刻的表面换热系数, $\{T\}$ 在变分过程中不参与变分运算^[3]。热物性系数可由下式计算

$$\lambda = \sum_{k=1}^4 \lambda_k \phi_k, \quad \rho C_V = \sum_{k=1}^4 (\rho C_V)_k \phi_k \quad (4.4)$$

式中, $\lambda_k, (\rho C_V)_k (k=1, 2, 3, 4)$ 分别对应于奥氏体, 珠光体, 贝氏体和马氏体的热物理系数, $\phi_k (k=1, 2, 3, 4)$ 分别对应于奥氏体, 珠光体, 贝氏体和马氏体的相变体积百分比。

当我们采用在子午面内采用 8 节点等参元时, 有限元基本方程为:

$$[K]\{T\} + [N]\{T\} = \{F\} \quad (4.5)$$

式中, $[K]$ 为导热矩阵, $[N]$ 为热容矩阵, $\{F\}$ 为通边界对流换热引起的贡献。虽然, T 不能参与变分, 但可以用差分格式代替。这里我们采用 Crank-Nicolson 格式

$$\frac{1}{2} \left[\frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{n-1} + \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_n \right] = \frac{T_n - T_{n-1}}{\Delta t} \quad (4.6)$$

即:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 2 \frac{T_n - T_{n-1}}{\Delta t} - \frac{\partial T_{n-1}}{\partial t} \quad (4.7)$$

这样, 有限元基本方程变为:

$$\left[[K] + \frac{2}{\Delta t} [N] \right] \{T\} = \{F\} + \frac{2}{\Delta t} [N] \{T\}_{n-1} + [N] \{T_{n-1}\} \quad (4.8)$$

在有限元计算中, 我们采用 8 节点平面等参元在子午面内划区域。在轴线上, 我们有

$$\frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = 0 \quad (4.9)$$

并假定 t_{n-1} 时刻的表面温度 $\{T_{n-1}\}$ 已知, 于是, 可以从图 2 中得到 $h\{T_{n-1}\}$ 。根据 $h\{T_{n-1}\}$, 求解有限元基本方程(4.8), 我们可以得到 $\{T\}$ 。直到淬火过程结束。

表 2 材料各相热物性系数与温度的关系^[8]

温度/°C	20	200	300	400	500	600	700	800	900	
$\rho C_V (10^{-3} \times W_s/mm^3K)$	3.54	4.32			4.57			4.75	4.95	奥氏体
			4.0		4.3			4.6	4.77	珠光体
	3.54	3.85		4.16		4.47				贝氏体
	3.54	3.85	4.0	4.2						马氏体
$\lambda (10^{-3} \times W_s/mmK)$	4.4	1.7			2.1			2.3	2.5	奥氏体
			4.1		3.6			2.9	2.0	珠光体
	4.4	4.25		3.9						贝氏体
	4.4	4.25	4.1	3.9						马氏体

§ 5. 计算结果

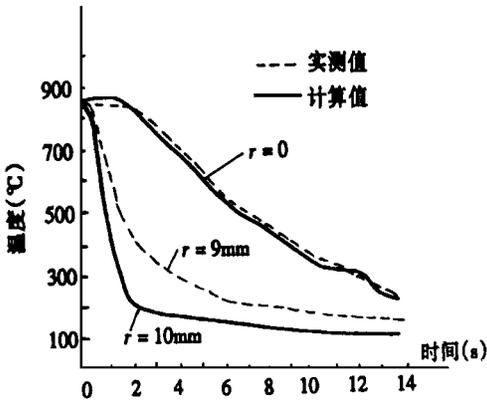


图3 温度得计算值和实验值的比较

试件为 $\phi 20\text{mm} \times 60\text{mm}$ 的圆柱体, 材料为 42CrMo 钢加热至 850°C , 放入 20°C 水中。对于 42CrMo 钢, 珠光体相变的初温度和终了温度分别为 725°C 和 560°C ; 贝氏体相变的初始温度为 600°C ; 马氏体相变的初始温度 M_s 和终了温度 M_f 分别为 360°C 和 160°C 。相变潜热 $\Delta H_{\gamma-\alpha, 100\%} = 0.326\text{W s/mm}^3$, 材料在各相下的的热物性系数 ($\lambda, \rho C_V$) 见表 2。

图 3 表示计算值与实测值的比较, 由图中我们可以得到以下结论:

(1)、在轴线上(即 $r = 0$ 处), 考虑非线性表面换热系数所得到的结果更接近实测结果, 这说明,

在计算淬火过程中的温度场时, 应考虑表面热交换系数的非线性效应。

(2)、在快速冷却过程中热沸腾机理尚不清楚的情况下, 文献[2]给出的确定非线性表面换热系数的方法是有效, 并易于工程应用。

参 考 文 献

- 1 A. Majorek, The influence of heat transfer on the development of stresses, residual stresses and distortions in martensitically hardened SAE 1045 and SAE 4140, Proceedings of First Int. Conf. on Quenching and Control Distortion, Chicago, USA (1992), 171—179.
- 2 Cheng Heming, A. Majorek and Wang Honggang, Determination of surface heat transfer coefficient of 42CrMo steel cylinder with phase transformation during quenching, Proceedings of IMMM' 95, Beijing (1995), 345—351.
- 3 王洪纲,《热弹性力学概论》, 清华大学出版社 (1989).
- 4 R. F. Prince and A. J. Fletcher, Determination of surface heat transfer coefficients during quenching of steel plates, Metals Technology, 2 (May 1980), 203.
- 5 S. Denis, D. Fariás and A. Simon, Mathematical model coupling phase transformation and temperature evolution in steels, ISIJ International, 32 (1992), 316.
- 6 I. Tzitzelkov and H. Paul, Eine mathematische methode zur beschreibung des unwandungsverhaltens eutektoidischer staehle, Arch. Eisenhüttenwes, 45 (1974), 525.
- 7 A. Majorek, Programmdokumentation, Institut fuer Werkstoffkunde I, University Karlsruhe (1992).
- 8 C. E. Bates, Quenching of Steels, in: ASM Handbook 4, Heat Treating, ASM International (1991), 72.

Finite Element Analysis of Temperature Field with Phase Transformation and Non_Linear Surface Heat_Trasfer Coefficeint during Quenching

Cheng Heming Zhang Shuhong Wang Honggang Li Jianyun
(Kunming University of Science and Technology , Kuming 650093, P . R . China)

Abstract

The calculation of temperature field has a great influence upon the analysis of the thermal stresses and stains during quenching, and also upon the residual stresses and microstructure of the workpiece after quenching, too. In this paper, a 42CrMo steel cylinder was taken as an investigating example. From the TTT diagram of the 42CrMo steel, the CCT diagram was simulated by mathematical transformation, and the volume fraction of phase constituents was calculated. The thermal physical properties were treated as the functions of temperature and the volume fraction of phase constituents. Finally, the temperature field with phase transformation and non_linear surface heat_transfer coefficients was calculated with finite element method, and the corresponding functional of temperature was established.

Key words finite element method, quenching, heat conduction, phase transformation