

# 中高淬透性钢末端淬火的数值模拟

姚 新<sup>1</sup>, 朱祖昌<sup>2</sup>, 顾剑锋<sup>1</sup>, 胡明娟<sup>1</sup>, 张伟民<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学教育部高温材料与高温测试重点实验室, 上海 200030;

2. 上海工程技术大学材料科学与工程系, 上海 200336)

**摘 要:** 采用非线性有限元法研究了中高淬透性钢的一种末端淬火过程。温度场的求解考虑了端淬试样端部及侧面的散热, 同时考虑了材料的热性能参数随组织及温度的变化及表面换热系数随温度的变化。扩散型相变的组织场计算基于叠加原理及 Avrami 方程, 而非扩散型相变的计算基于 K-M 公式。模拟结果表明: 马氏体仅存在于距端面约 30mm 的区域, 贝氏体分布于距端面约 10~110mm 的区域, 而距端面 110mm 以上全部生成珠光体组织。试验同模拟结果基本吻合。

**关键词:** 数值模拟; 有限元; 末端淬火

中图分类号: TGI62.4, O241.82

文献标识码: A

文章编号: 1000-3738(2003)08-0008-03

## Numerical Simulation of an End-quenching Process for Steels with Middle and High Hardenability

YAO Xin<sup>1</sup>, ZHU Zuchang<sup>2</sup>, GU Jian-feng<sup>1</sup>, HU Ming-juan<sup>1</sup>, ZHANG Wei-min<sup>1</sup>

(1. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. Shanghai Polytechnic University, Shanghai 200336, China)

**Abstract:** A non-linear Finite Element Method (FEM) was used to simulate the end-quenching process of a P20 steel specimen encapsulated with refractory insulated material. In the model, the thermal loss through the top and side surfaces was considered. The temperature and structural dependent properties of the steel, associated with the temperature dependent heat transfer coefficient, were also considered in the thermal analysis. For structural analysis, the additivity rule was adopted to calculate the incubation period of the diffusional phase transformations, and the famous Avrami Equation was used to calculate the amount of the phases. Diffusionless transformation was computed by the Koistinen-Marburger equation. The simulated results showed that martensite existed in the area 30mm away from the Jominy end, bainite existed 10~110mm from the Jominy end, and the rest area was composed of pearlite and ferrite. Optical observations at tested the validity of the present model.

**Key words:** numerical simulation; FEM; end-quenching

## 1 引 言

从 1938 年 W E Jominy 用端淬试验法得出端淬曲线以来, 人们对端淬曲线做了大量的研究工作<sup>[1,2]</sup>, 标准的端淬试验法也成为目前用于测定材料淬透性最常用的方法。但对于一些中高淬透性钢, 标准端淬法已不适用。作者使用一种试样表面包覆耐火保温材料的端淬法来测定中高淬透性钢的淬透性, 并取得了很好的效果。即将加热至淬火温

度并保温的端淬试样迅速转移至厚的圆筒形保温材料中, 而试样端面仍然按照标准的端淬法进行喷水淬火, 直至试样充分冷却。为了研究端淬试样通过这种方式进行端淬时工件各部分的冷却速度及组织变化情况, 用有限元法对 P20 钢的上述端淬过程进行了数值模拟。模拟过程中考虑了相变的影响, 并对模拟结果进行了试验验证。

## 2 计算模型

针对端淬试样的几何形状, 建立了温度场模型来计算瞬态温度场。在增量步开始时, 根据初始温度计算出组织转变和相应的相变潜热, 然后由相变潜热修正温度场, 多次迭代得到最终的温度分布及

收稿日期: 2002-08-02; 修订日期: 2002-10-08

作者简介: 姚 新(1973 - ), 男, 山东临沂人, 上海交通大学博士生。

导师: 潘健生院士

相组成。基于温度和组织计算,同时还对端淬试样的硬度进行了预测。下面分别简要说明各部分的计算模型。

2.1 温度场计算模型

温度场的控制方程为<sup>[3]</sup>:

$$\frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( -r \frac{\partial T}{\partial z} \right) + r \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + \dot{q} = c \frac{\partial T}{\partial t} \tag{1}$$

式中、 $c$  分别为材料的导热系数、密度和比热容; $\dot{q}$  为热流密度速率。

边界条件为:

水冷端: -  $\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = h_1 (T_s - T_m)$

侧面从  $z=0$  至  $z=L_0$  处:

$$- \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{z=0 \sim L_0} = (T_s^4 - T_{inf}^4)$$

头部: -  $\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=L} = h_2 (T_s - T_f)$ , 侧面  $z > L_0$  处: -  $\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = h_2 (T_s - T_f)$  (2)

在端淬过程中,端部进行喷水冷却,试样侧面从  $z=0$  至  $L_0$  (本例中  $L_0=5\text{mm}$ ) 处未被保温材料包覆,相当于空冷。而侧面  $z > L_0$  处及头部被保温材料包覆,也有微弱的导热。在上面公式中,  $h_1$  为端淬水冷端的表面换热系数,它是温度的函数;  $h_2$  为试样侧面与耐火保温材料间的换热系数; 是工件的表面辐射率; 是 Stefan-Boltzmann 常数;  $T_m$ 、 $T_{inf}$ 、 $T_f$  分别是水、外界空气和耐火保温材料的温度;  $T_s$  为试样表面温度。文中表面换热系数  $h_1$  的值选用文献[4]的数据。

$$h_1(T) = -0.167 \times 10^4 + 0.108 \times 10^3 T - 0.0977 T^2 \tag{3}$$

试样的初始温度为  $860^\circ\text{C}$ , 喷水温度为  $20^\circ\text{C}$ 。P20 钢的热性能参数取自文献[5,6]。

2.2 组织场计算模型

组织场与温度场是相互耦合的。在组织场计算中,将冷却过程视为一系列短的等温过程,对应于一定量的组织转变。转变量在每一时间步内按等温过

程计算。对于扩散型相变,首先由 Scheil 叠加法则计算孕育期,当孕育期  $S$  达到 1 时,开始发生组织转变。扩散型相变转变量由 Avrami 方程来计算:

$$V_k = V_r [1 - \exp(-bt^n)] \quad k = F, P, B \tag{4}$$

式中  $V_k$  是  $k$  相的转变量;  $V_r$  是相变开始时奥氏体的体积分数;  $t$  为转变时间;  $b$  和  $n$  为取决于温度和相组成的参数。

对于非扩散型的马氏体转变,当温度在  $M_s$  与  $M_f$  之间时,采用指数型的 Koistinen-Marburger 公式来计算,转变量取决于转变温度:

$$V_M = V_r \{1 - \exp[-0.001(M_s - T)]\} \tag{5}$$

为了避免在转变过程中由于相变潜热引起温度回升而造成转变量减小,在模型中做了以下定义:

$$V_k(i) = \begin{cases} V_k(i) & V_k & V_k(i-1) \\ V_k(i-1) & V_k(i) & V_k(i-1) \end{cases} \quad k = F, P, B, M \tag{6}$$

式中  $V_k(i)$  为增量步为  $i$  时  $k$  相的转变量。

2.3 几何模型与有限元划分

端淬试样长度为  $L=200\text{mm}$ , 直径  $R=25\text{mm}$ , 其有限元网格的划分见图 1。对试样端面及侧面的网格进行了细分。而沿轴向特别是端面处存在第三类边界条件,热交换非常剧烈,因此对端面及侧面处的网格进行细分。

3 试验材料和方法

为验证上述模型的正确性,设计并进行了以下试验:用 P20 钢作为试验材料,其成分见表 1。将 P20 钢加工成  $\phi 25\text{mm} \times 200\text{mm}$  的圆柱试样,将试样加热至  $860^\circ\text{C}$  并保温 30min 后,迅速转移至耐火保温材料套筒中露出长  $5\text{mm}$  的一段(即  $L_0=5\text{mm}$ ),并按照标准端淬法进行末端淬火,水温控制在  $20^\circ\text{C}$ 。然后在试样的不同部位取样,制成金相试样,进行组织分析。

表 1 P20 钢的化学成分(质量分数,%)

Tab.1 Chemical composition of P20 steel (mass, %)								
C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Ni	Mo
0.28	0.20	0.60	0.03	0.03	0.25	1.40	0.25	0.30

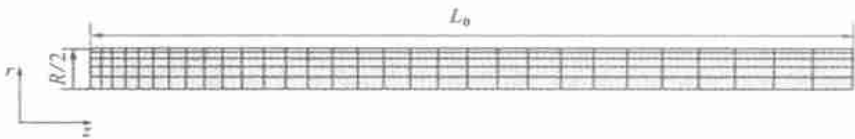


图 1 端淬试样的有限元网格划分  
Fig. 1 Finite element mesh of the end-quench specimen

4 结果与分析

4.1 温度场计算结果

表面包覆耐火保温材料端淬法的传热方式已与标准端淬法不同。由于端淬试样是轴对称的,与无关,可视为二维导热问题。式 2 中  $h_2$  的值相对较小,在计算中未予考虑。通过求解上述的理论模型,可以得到端淬试样各节点处的冷却曲线。图 2 示出了试样内距端面 0、5、10、50、100、200mm 处的冷却曲线。可见,随着离端面距离的增大,各点处的冷却速度发生很大的变化。如在距端面 5mm 处,从 860℃ 冷至 200℃ 只需约 40s;而在距端面 200mm 处,却需要约 6 000s。由于 P20 钢在冷却过程中发生相变,产生相变潜热,试样近头部位置处的冷速明显减慢,并会使温度回升。

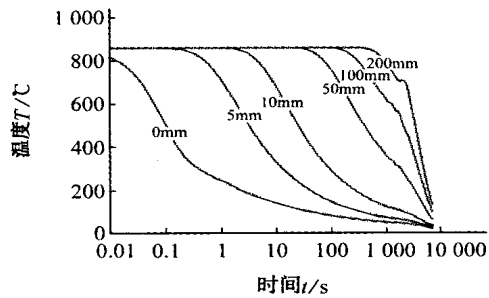


图 2 距端面不同位置处节点的冷却温度

Fig. 2 Cooling temperatures of the nodes in different positions

根据上述的理论模型,在硬度预测时,需要已知各点在 700℃ 时的冷却速度。通过编制的有限元程序,求得距端面不同位置处的冷却速度见图 3。可见,距端面越近,冷却速率越大;在距端面 100mm 以上时,冷却速度已变得非常小。

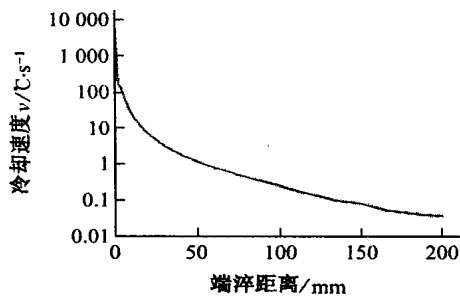


图 3 距端面不同位置处在 700℃ 时的冷却速度

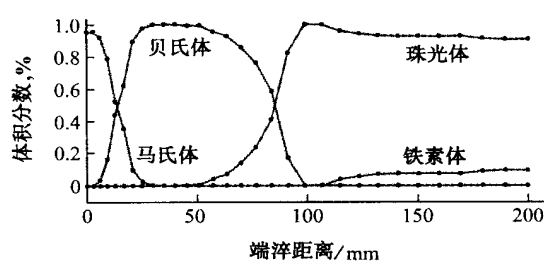
Fig. 3 Relationship between distance from water-cooled end and cool rate at 700

4.2 组织场计算与试验结果

与温度场相耦合的组织场是温度与淬火时间的

函数。根据组织场的计算模型,求得在冷却 7 200s 后端淬试样内马氏体、贝氏体、铁素体和珠光体的分布见图 4a。马氏体仅存在于距端面约 30mm 的区域,贝氏体分布于距端面约 10 ~ 110mm 的区域,而在距端面 110mm 以上基本全是伪共析组织。图 4b 中显示了贝氏体在端淬试样内分布的云图。

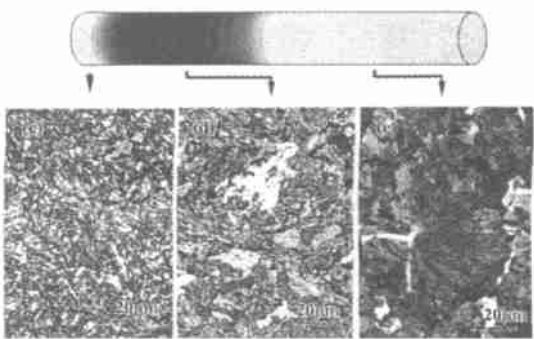
为了验证模拟结果的正确性,在端淬表面、距端面 50mm 及距端面 150mm 三个位置处取样,磨制出金相试样并观察,分析结果见图 4c。可见,端淬表面形成了由针状马氏体与板条马氏体组成的混合组织,而在距表面 50mm 处形成了基本由粒状贝氏体组成的组织;而在距端面 150mm 处形成珠光体及少量的铁素体组织。这与模拟结果吻合得很好。



(a) 端淬试样内不同组织的分布



(b) 贝氏体分布云图



(c) 端淬面处的显微组织 (马氏体) (d) 距端面 50mm 处的显微组织 (贝氏体) (e) 距端面 150mm 处的显微组织 (珠光体及少量铁素体)

图 4 端淬 7 200s 后端淬试样内的组织分布及试验测试结果

Fig. 4 Calculated and experimental results of structure distribution after 7 200s of end-quenching (a) Calculated results of structure distribution (b) Contour of bainite distribution (c) Metallograph of the quenching end (martensite) (d) Metallograph of the section 50mm from the quenching end (bainite) (e) Metallograph of the section 150mm from the quenching end (pearlite and a little fraction of ferrite) (下转第 30 页)

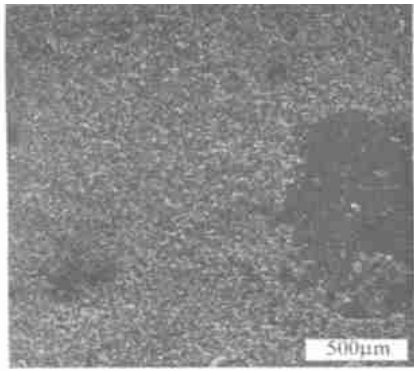


图8 拉伸断裂后断面的SEM形貌  
Fig.8 Fracture surface after tension test

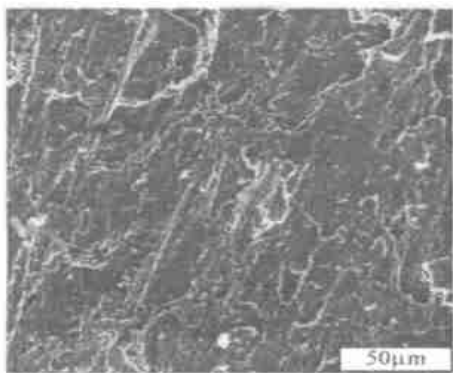


图9 剪切断裂后断面的SEM形貌  
Fig.9 Fracture surface after shearing test

料易于被剪断<sup>[9]</sup>。在单边剪切状态下,靠近界面处的钢基体成为剪切断裂的薄弱环节,覆层也没有从覆层/钢基体的结合界面处剥离断裂,同样表明覆层/钢基体之间具有牢固的冶金结合。

## 5 结 论

(1) 三元硼化物基金属陶瓷覆层与钢基体之间

具有较高的结合强度,三点弯曲法、拉伸法和单边剪切法测定的结合强度值分别为 740.38、320.95 和 242.21MPa。

(2) 覆层与钢基体之间具有良好的界面结合状态,形成了紧密的冶金结合。

(3) 在弯曲、拉伸、剪切三种应力状态下,覆层与钢基体之间的断裂破坏不是由于覆层与钢基体之间结合界面的剥离,而是发生于界面附近的钢基体和覆层内。

(4) 在弯曲、拉伸、剪切三种应力状态下,覆层与钢基体之间发生断裂破坏之前试样都产生了较大的变形。

### 参考文献:

- [1] Takagi S, Ohira T Ide, et al. New P/M iron containing multiple boride base hard alloy[A]. E N Aqua, C I Whitman. Modern Developments in Powder Metallurgy[C]. Princeton NJ: MPIF, 1985. 153 - 166.
- [2] Takagi K I, Komai M, Matsuo S. Development of ternary boride base cermets [A]. Powder Metallurgy Proceeding of World Congress, PM'94[C]. Paris: European powder metallurgy association, 1994. 227 - 234.
- [3] German R M, Hwang K S, Madan D S. Anaysis of Fe-Mo-B sintered alloys[J]. Powder Metall Int, 1987, 19(2): 15 - 18.
- [4] 刘福田,李兆前,黄传真. 三元硼化物基金属陶瓷复合材料及其液相烧结机理[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2001, 15(4): 291 - 295.
- [5] Tsuneyuki Ide, Teiichi Ando. Reaction sintering of an Fe-6wt pct B-48wt pct Mo alloy in the presence of liquid phases[J]. Metallurgical Transactions A. 1989, 20A: 17 - 24.
- [6] 刘福田,李兆前,黄传真. 三元硼化物基金属陶瓷覆层性能的研究[J]. 机械工程材料, 2003, 27(7): 30 - 34.
- [7] 刘福田,李兆前,黄传真. 金属陶瓷复合涂层技术[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2002, 16(1): 84 - 91.

(上接第 10 页)

## 5 结 论

应用非线性有限元法模拟了端淬后 P20 钢试样的组织分布。指出马氏体仅存在于距端面约 30mm 的区域,贝氏体分布于距端面约 10 ~ 110mm 的区域,而在距端面 110mm 以上基本全是珠光体。金相检测结果表明模拟结果基本是正确的。

### 参考文献:

- [1] 缪宗华,胡为颖. 钢的端淬曲线优化拟合研究[J]. 金属热处理学报, 2000, (3): 57 - 60.

- [2] Marrow J. Understanding the Jominy end quench test[J]. Industrial Heating, 2001, 68(10): 84 - 86.
- [3] 刘庄,吴肇基,吴景之,等. 热处理过程数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [4] Hömberg D. A numerical simulation of the Jominy End-Quench test[J]. Acta Metallurgica, 1996, 44(11): 4375 - 4385.
- [5] American Society for Metals. Metals Handbook [M]. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1989.
- [6] 赵建生,乔学亮,孙培祯,等. P20BSCa 大截面塑料模具钢淬透性的研究[J]. 金属热处理, 1994, (7): 3 - 7.
- [7] Li M V, Niebuhr D V, Meekisho L L, et al. Computational model for the prediction of steel hardenability[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1998, 29B(6): 661 - 673.