

4.3 第二相质点与疲劳强度

在 870 °C 加热淬火时,淬火组织中有未溶的碳化物,即第二相质点,第二相质点对平面应变断裂韧性 K_{Ic} 值的影响,有时远远超过了晶界的作用,第二相质点数量少、体积小、形状圆以及分布均匀时,可使 K_{Ic} 值大大提高。

对于韧性材料纳米微裂纹演化过程表明:纳米微裂纹在裂尖无位错区形核后,先钝化成空洞,并不断长大,各空洞最后相连使裂纹扩展长大^[6]。第二相质点与基体界面在疲劳应力作用下与基体剥离,并造成应力集中,有利于空洞的形成与长大,即有利于裂纹的形核长大。粗大的第二相质点和基体的界面常常是裂纹形核的地点,而第二相质点在裂纹扩展过程中的作用则不如形核过程明显。

4.4 裂纹形核过程对疲劳寿命的影响

大多数结构钢在疲劳试验中,裂纹形核所占的周次比例很大,且形核多以剥离机构为主^[7]。若 N_f 为总疲劳周次; N_i 为裂纹形核周次; N_p 为裂纹扩展周次,则 $N_f = N_i + N_p$ 。并且随着疲劳试验周次的增加,裂纹形核周次 N_i 所占的比例将增大,因此可利

用改变组织的方法,减少裂纹形核源,控制裂纹的形核,来提高扭力轴的疲劳寿命。

扭力轴的强韧化手段还很多,如预形变强化,表面强化等,总之,合理的冷热加工配合,可以相互补充,提高扭力轴的疲劳寿命。

5 结语

45CrNiMoVA 钢扭力轴采用 910 °C 高温淬火,使碳化物变小或全部溶解,在保证强度韧度的同时,提高了裂纹形核周次,对提高扭力轴疲劳寿命有益。

参考文献:

- [1] 坦克车辆金相图谱编写组. 坦克车辆金相图谱-组织部分[M]. 北京:国防工业出版社,1986.
- [2] 坦克车辆金相图谱编写组. 坦克车辆金相图谱-缺陷部分[M]. 北京:国防工业出版社,1986.
- [3] 廖嘉琪,江韶光. 高温淬火对 3Cr2W8V 钢组织性能的影响[J]. 金属热处理,1998,23(2):9-12.
- [4] 胡光立,谢希文. 钢的热处理(原理和工艺)[M]. 西安:西北工业大学出版社,1993.
- [5] 余德刚,谈育熙. 钢的组织强度学-组织与强韧化[M]. 上海:上海科学技术出版社,1983.
- [6] 黄克智,肖纪美. 材料的损伤断裂机理和宏微观力学理论[M]. 北京:清华大学出版社,1999.
- [7] 肖纪美. 金属的韧性与韧化[M]. 上海:上海科学技术出版社,1980.

计算机应用

P20 钢大型塑料模具几种淬火工艺的三维温度与组织模拟

姚 新,顾剑锋,胡明娟

(中国机械工业联合会先进热处理与表面工程技术研究中心 上海交通大学,上海 200030)

摘要:通过建立合适的三维有限元模型,研究了 P20 钢大型模具按 3 种工艺进行淬火时的温度组织变化。模拟结果表明,工艺 a 造成了模块内过大的温度梯度;工艺 b 通过多次空冷加水淬使工件内的温度梯度下降;而工艺 c 使已转变的马氏体和贝氏体产生自回火。温度的模拟结果与测量结果一致。

关键词:淬火;塑料模具钢;数值模拟

中图分类号: TG162.4, O241.82 **文献标识码:** A **文章编号:** 0254-6051(2003)07-0033-05

3D Temperature and Microstructure Modelling of Large-scale P20 Steel Mould Quenching in Different Processes

YAO Xin, GU Jian-feng, HU Ming-juan

(Technical Center of Advance Heat Treatments and Surface Engineering of

Chinese Machinery Industry Association, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Based on the three-dimensional Finite Element Method (FEM), the temperature and microstructure variations of large-scale P20 steel mould during quenching in 3 different processes were studied. The results show that significant temperature gradient exists during quenching in process a. The temperature gradient is less steep during quenching in process b by alternative water and air cooling. And the transformed martensite and bainite are self-tempered by process c. The calculated temperature is in agreement with the measured one.

Key words: quenching; plastic mould steel; numerical simulation

1 引言

随着我国工业的迅速发展,市场对大型塑料模具钢的需求量日益增加。P20 钢作为近年来国际上使用最广泛的一种塑料模具钢,具有冶金生产工艺简便,成材率高,钢材价格便宜等优点。而且在预硬化硬度为(30~35)HRC 时,其冲击韧性较高,淬透性好,可以使较大截面的钢材获得均匀的硬度,尤其是该钢种的镜面抛光性能明显优于普碳钢及低合金钢,因此它成为制造大型塑料模具的理想钢种^[1]。

目前常用的 P20 钢大模块的热处理工艺是油淬加高温回火。在本文的工作中,尝试使用预冷+水淬+自回火进行 P20 钢大模块的淬火,对淬火过程中工件的温度和组织进行了三维有限元模拟,同时对模拟结果进行了试验验证。

2 计算模型

2.1 热传导方程

工件淬冷过程可归结为求解瞬态非线性热传导方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

相应的边界条件及初始条件分别为:

$$k \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k \frac{\partial T}{\partial z} n_z + h(T - T_a) = 0 \quad (2)$$

$$T(x, y, z, t)|_{t=0} = T_{\text{initial}} \quad (3)$$

式中, h 为表面换热系数, n_x, n_y, n_z 为方向余弦, k , c 分别为材料的导热系数、密度和比热容,它们都是相组成及温度的函数,可表示为:

$$(k, c) = \sum_k k_k(T) = \dots, c$$

$$k = A, M, B, P, F \quad (4)$$

其中 k_k 为 k 相的体积分数, k 代表奥氏体(A)、马氏体(M)、贝氏体(B)、珠光体(P)或铁素体(F)。对于其它的物性参数,同样可以根据上式得到。

式(1)中 \dot{q} 定义为:

$$\dot{q} = H_k \frac{d k}{d t} \quad (5)$$

其中 H_k 为单位体积内的 k 相的相变潜热,温度场通过此项保证与组织场的耦合。

当界面换热系数发生剧烈变化时,会引起温度场计算时的振荡。此时应适当减小时间步长,并增

大收敛量,以保证温度场计算的顺利进行。

2.2 表面换热系数的确定

表面换热系数用于确定第三类换热边界条件,是温度场计算中的一个重要参数。换热系数的确定通常是运用反传热法^[2]。在本文的模型中,水的换热系数 h_{water} 取自文献[3],并示于图1中。空气的换热系数(h_{air})是辐射换热系数(h_r)和对流换热系数(h_c)之和。对于辐射换热系数(h_r)可用下式计算:

$$h_r = \epsilon (T_w^2 + T_a^2) (T_w + T_a) \quad (6)$$

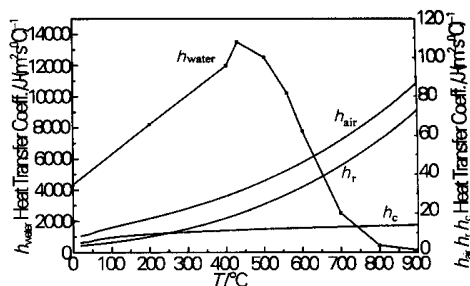


图1 水和空气的表面换热系数

Fig. 1 Heat transfer coefficient of water and air

其中, ϵ 是工件的表面辐射率,依工件的表面状况及温度的不同一般取 0.1~0.8^[4],本文中取为 0.6。 σ 是 Stefan-Boltzmann 常数,为 $5.768 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{K}^4)$ 。 T_w 和 T_a 分别是工件的表面温度及外界环境温度。空冷对流换热系数 h_c 可利用以下经验公式求得^[4]:

$$h_c = 2.56 \sqrt[4]{T_w - T_a} \quad (7)$$

换热系数随工件表面温度的变化示于图1中,从图中可以看出,在高温下,辐射是工件主要的传热方式,而当表面温度低于 250 °C 时,对流将成为主要的传热方式。

2.3 组织转变的计算

温度场与组织场的耦合使工件内任一点的相组成是温度和时间的函数。组织场的模拟是基于 TTT 曲线,叠加原理及 Avrami 方程。本试验实测了 P20 钢的 TTT 曲线,并示于图2中。对于扩散型相变,运用 Scheil 叠加原理计算转变的孕育期。当孕育期 > 1 时,在一个增量步 Δt 内,根据 Avrami 方程首先计算虚拟转变时间和虚拟转变量,然后根据当前增量步内的温度值计算 Δt 时间内的转变量增量,与虚拟转变量叠加得到当前时间步内的转变量。对于非扩散型的马氏体转变,运用 Magee 公式计算其转变量。另外,对组织场计算作以下几点说明:

(1) 发生了珠光体转变后,其后的贝氏体转变不可能进行完全,同样,在发生了贝氏体转变后,也

作者简介:姚新(1973.4—),男,山东临沂人,博士生,主要从事材料热加工过程的计算机模拟方面的研究。Tel:021-62932563-8011 E-mail:xin_yao@Yahoo.com

收稿日期:2002-12-15

不可能形成 100 % (体积分数) 的马氏体。在这种情况下,Avrami 方程应作以下修正:

$$V_i = V_{\max} [1 - \exp(-bt^n)] \quad (8)$$

其中, V_{\max} 为 i 相的最大转变量。

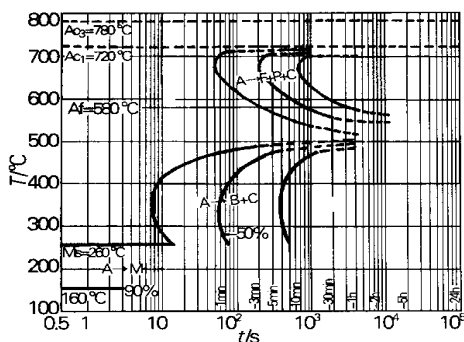


图2 P20 钢的 TTT 曲线

Fig. 2 TTT curve of P20 steel

(2) 在实际运用 TTT 曲线计算转变量时,由于转变开始点和转变终了点的测定存在较大的误差,因此在运用 Avrami 方程计算任一温度下(8)式中的参数 n 和 b 时,是通过转变量为 10 % (体积分数) 和 90 % (体积分数) 的两组方程来确定的,而并非利用转变开始线和转变终了线。

(3) 用一个 Avrami 方程计算先共析铁素体和珠光体。因为铁素体沿奥氏体晶界析出,当其生长前沿尚有很充裕的空间,在远未达到因铁素体相互碰撞使形核率下降的阶段就发生了珠光体转变。而且连续冷却时珠光体转变开始点难以确定,因为奥氏体的含碳量随铁素体析出而不断改变,并且连续析出生成的珠光体是伪共析体,其含碳量随温度的下降而减少。因此用两独立的 Avrami 方程描述这一现象缺乏充分的理由。而用一个 Avrami 方程计算可以获得与试验结果更为接近的结果^[5]。

2.4 几何模型及有限元网格划分

本试验及模拟所用的 P20 钢大型塑料模块为一长方体,尺寸为 1700mm × 1000mm × 460mm,如图 3 所示。由于大模块的对称性,只取其八分之一进行模拟。对其进行有限元网格剖分,在表面处进行了网格细分,以提高计算精度。整个模型共划分成 480 个三维热传导单元,由 693 个节点组成。在模块外表面施加第三类边界条件,换热系数根据上述模型用子程序定义,在模块内表面施加绝热边界。

模块的初始组织为奥氏体,初始温度为 860 ,选择不同的水冷和空冷时间,最终淬至外界环境温度。水及外界空气的温度都设为 20 。P20 钢的物

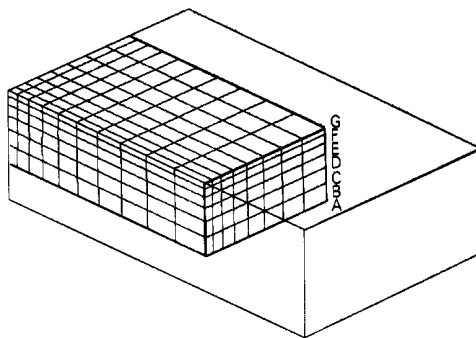


图3 P20 钢大模块的几何外形及有限元网格划分

Fig. 3 Geometry and finite element mesh of the large scale P20 steel mould

理性能参数大多取自文献[6]。其中奥氏体转变为珠光体/铁素体的相变潜热取为 $(1.56 \times 10^9 - 1.5 \times 10^6 T) \text{ (J/m}^3\text{)}$,转变为贝氏体的相变潜热取为 $6.2 \times 10^8 \text{ (J/m}^3\text{)}$,转变为马氏体的相变潜热取为 $6.5 \times 10^8 \text{ J/m}^3$ ^[4]。

3 模拟结果与分析

3.1 工艺 a

工艺 a 是最简单的淬火工艺,它是将工件从 860 直接淬入 20 的水中,未进行空气预冷或中间提起空冷。

图 4 为模块中部从表面至心部 7 个点 (A ~ G 点,参见图 3) 的冷却曲线。由图可见,在直接水淬时,工件表面和心部存在很大的温差,容易引发大的热应力导致工件的变形或开裂。心部 A 和 B 点在淬火过程中温度的明显回升是由相变潜热造成的。

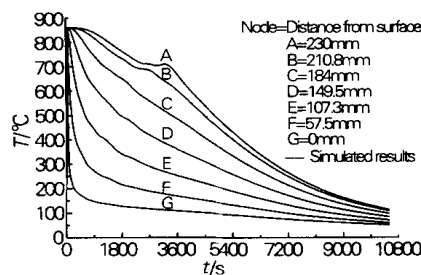


图4 由工艺 a 模拟所得模块表面至中心各点的冷却曲线

Fig. 4 Calculated cooling curves from the surface to the core of the mould quenching in process a

在水淬 3h 后,沿模块中轴线 AG 上的组织分布如图 5 所示。从表面至中心,显微组织分别为马氏体 + 贝氏体、贝氏体、铁素体 + 贝氏体 + 珠光体、铁素体 + 珠光体。

3.2 工艺 b

工艺 b 是将模块在空气中预冷后水淬,在淬火过程中两次提起空冷。具体的工艺过程为:空冷

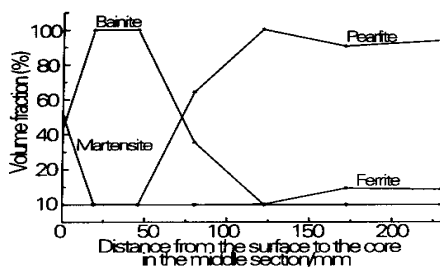


图 5 由工艺 a 模拟所得模块中轴线上的组织分布

Fig. 5 Structures distribution along central axis of the mould quenching in process a

1200s 水淬 4500s 空冷 280s 水淬 1500s 空冷 330s 水淬 2600s。图 6 为中轴线上 A ~ G 点依据工艺 b 处理的冷却曲线。与工艺 a 相比,大模块内部温度梯度已明显降低,但表面及边角处已低于 Ac_1 点 (720 °C),产生了较多的珠光体。当大模块第一次从水中提起,并在空气中预冷时,由于表面换热系数的大大降低,表面点 G 从 100 °C 上升至 180 °C,次表面的温度也有不同程度的上升。图 6 还示出了大模块

实际按工艺 b 处理时,当其处在空气中时用红外线温度计对表面点 G 的温度测量结果。由图可见,模拟结果与实测结果吻合得很好。

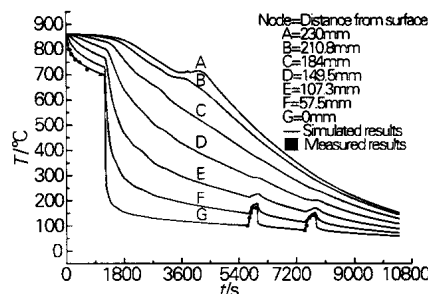


图 6 由工艺 b 模拟出的表面至中心点的冷却曲线

Fig. 6 Calculated cooling curves from the surface to the core of the mould quenching in process b

图 7a、b、c 示出了大模块在淬火 3h 后各相在模块中的分布情况。从图中可见,对于大型的 P20 钢模块,水淬后仍存在大量的珠光体(图 7a),贝氏体存在于表面至表面下 80mm 处(图 7b),而马氏体却只存在于表面(图 7c)。

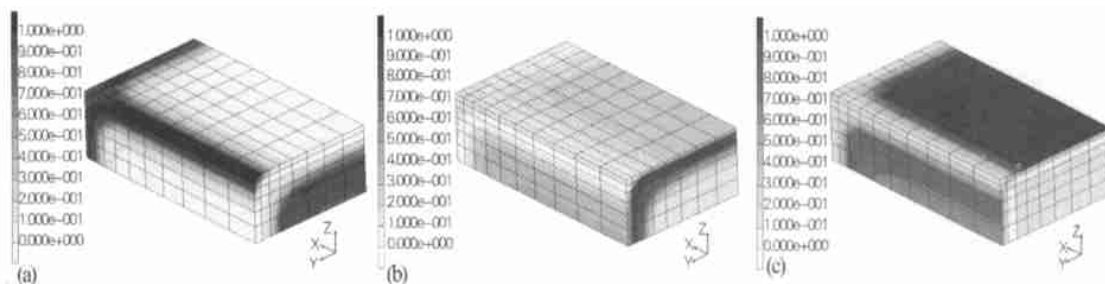


图 7 按工艺 b 淬火 3h 后组织分布图:(a) 珠光体 (b) 贝氏体 (c) 马氏体

Fig. 7 Structures distribution of the mould after quenching for 3h in process b

(a)pearlite (b)bainite (c)martensite

3.3 工艺 c

与工艺 b 类似,工艺 c 也采用预冷,水淬和空冷相结合的方式进行淬火。但各阶段的时间不同,而且模块在第二次出水后,并没有再次入水。具体的工艺为:空冷 600s 水淬 1800s 空冷 300s 水淬 3600s 空冷。

按照工艺 c 处理的模块,A ~ G 点的冷却曲线示于图 8 中,为减少表面的珠光体含量,预冷时间缩短为 10min,此时 G 点的温度约为 730 °C,高于 Ac_1 点。在模块入水 30min 后,表面及近表面的奥氏体都已转变完全,此时将模块提出水面,让表面温度回升,降低表面心部温差,减小温度梯度。由图 8 还可以看出,G 点冷却曲线的模拟值与实测值符合的很好。

在模块再次入水 1h 后,将其提出水面空冷。此时奥氏体已经转变完全,在空气中冷却可以减小热

应力的影响,减小变形及开裂的可能性。而且由图 8 可见,模块在出水后,表面温度上升至 200 °C 左右,这使已转变的马氏体或贝氏体发生低温自回火,有助于组织稳定。

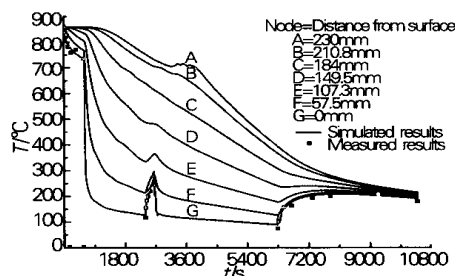


图 8 由工艺 c 模拟出的表面至中心点的冷却曲线

Fig. 8 Calculated cooling curves from surface to the core of the mould quenching in process c

4 结论

(1) 本文采用三维有限元模型对 P20 钢大型模

光束诱导 45 钢表面相变硬化过程温度场的三维数值模拟

赵楠楠,单际国,吴爱萍,任家烈

(清华大学 机械工程系,北京 100084)

摘要:采用数值模拟技术,可以使聚焦光束处理参数的优化过程更加经济、高效。在此背景下,本文建立了聚焦光束相变硬化过程温度场分布的三维数值分析模型。模型考虑了试样的有限尺度,试样材料热物理参数的温度依赖关系,以及对流、辐射造成的表面热损失。对尺寸为 12.5mm ×12.5mm ×90mm 的 45 钢试样的瞬态传热过程进行三维模拟,验证了模型的可靠性。计算得到的试样三维温度分布图像可用于预测聚焦光束处理产生的相变硬化层尺寸。结果表明,聚焦光束相变硬化过程温度场的空间分布是局域化的,并且具有极高速的加热和冷却过程。匀速扫描的聚焦光束相变硬化过程存在端部效应。

关键词:数值模拟;温度场;相变硬化;聚焦光束

中图分类号: TB115;TG113.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 0254-6051(2003)07-0037-05

3D Numerical Simulation for the Temperature Field Via Light Beam Remelt-free Hardening of Steel 45

ZHAO Nan-nan, SHAN Ji-guo, WU Ai-ping, REN Jia-lie

(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: By applying the numerical simulation technology, it makes the optimization process for light beam heating parameters more efficient and economic. Accordingly, a model has been developed for numerical simulation on 3D transience temperature field via light beam remelt-free hardening. The model is defined on the finite size. The change during the process of the thermalphysics properties of material, and the heat loss caused by convection and radiation are considered. The work piece is made of steel 45 with the size of 12.5mm ×12.5mm ×90mm. The reliability of the model has been testified by comparison of the simulation and the experimental results. The 3D temperature distribution can be used in forecasting the size of phase transformation zone. The temperature field distributes in a local zone and there is the end effect in the process. The heating and cooling rate are very high. The process parameter can be optimized based on the simulation.

Key words: simulation; temperature field; remelt-free hardening; light beam

作者简介: 赵楠楠(1978—),女,北京人,硕士生,主要从事光束加工温度场数值模拟及光束表面改性方面的研究。联系电话:010-62773798

基金项目: 国家自然科学基金(50275082),清华大学 985 基础研究基金

收稿日期: 2003-01-13

数值方法模拟温度场分布的技术始于 20 世纪 60 年代末,目前已建立了很多描述激光加工温度场的模型^[1~3]。数值模拟的方法已逐渐成为一种优化激光加工工艺参数的可行且经济的手段。而与激光同属高能密度热源的聚焦光束加工技术,在操作中仍依靠试验和经验来获得最佳的工艺参数,效率很低。

具的淬火过程进行了有限元模拟。模拟过程中考虑了材料性能参数随温度的变化以及相变潜热。同时解决了空冷和水淬交替进行时因换热系数剧烈变化所造成的温度场振荡问题。而且模拟结果和实测结果符合得很好。

(2) 计算了按 3 种工艺淬火时模块内部的温度场和组织场的变化,指出工艺 a 会造成工件内过大的温度梯度;工艺 b 通过预冷和空冷减小了温度梯度;工艺 c 在工件未完全冷透时提出空冷,使已发生转变的马氏体和贝氏体产生自回火。

参考文献:

- [1] 陈红桔,刘清友. 模具钢 P20 的动态断裂韧性[J]. 钢铁研究学报,1998,19(2):46-50.
- [2] Osman A M, Beck J V. Investigation of transient heat transfer coefficients in quenching experiments[J]. Journal of heat transfer, 1990,112:843-848.
- [3] Gü C H, Tekkaya A E, Schuler W. Effect of boundary conditions and workpiece geometry on residual stresses and microstructure in quenching process[J]. Steel Research, 1996,67(11):501-506.
- [4] 刘 庄,吴肇基,吴景之,张 毅. 热处理过程数值模拟[M]. 北京:科学出版社,1996.
- [5] 田 东. 界面突变淬火过程的计算机计算及实验测试[D]. 上海:上海交通大学,1998.
- [6] American Society for Metals. Metals handbook 9th ed[M]. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1978~c1989.