

718 塑料模具钢大模块淬火工艺的优化

宋冬利, 顾剑锋, **袁文庆**

(上海交通大学教育部高温材料及高温测试重点实验室, 上海 200030)

摘 要: 718 塑料模具钢在制造模具前需要进行淬火及回火预处理, 使硬度达到 29 ~ 35HRC, 要求同一截面的硬度差不大于 3HRC。然而对于大型的模块难以制定合理的预硬化工艺来保证硬度均匀一致且无淬火裂纹。为了改进并优化预硬化工艺, 对 718 钢大模块淬火过程的瞬态温度场及组织场进行了耦合数值模拟。通过比较三种不同淬火工艺的模拟结果, 为 718 模具钢大模块设计了一种较佳的淬火工艺, 即淬入水中之前先在空气中预冷, 淬水之后将模块出水在空气中自回火。

关键词: 淬火工艺; 数值模拟; 塑料模具钢

中图分类号: TGI42.33 文献标识码: A 文章编号: 1000-3738(2004)05-0022-04

Numerical Simulation on Quenching Process of Large-sized Plastic Mould Made of Steel 718

SONG Dong-li, GU Jian-feng, **YUAN Wen-qing**

(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Before made into mould, plastic mould steel 718 needs to be pre-hardened to 29 - 35HRC with the biggest hardness difference of 3HRC in the same section by quenching and tempering. It is very difficult to design suitable prehardening technology which can ensure consistent hardness distribution without any cracks on large modules. In order to improve and optimize the pre-hardening technology, the temperature field and microstructure field of large sized plastic mould made of steel 718 were numerically simulated. By comparing the simulation results of different quenching technologies, a better quenching technology was worked out, i. e., pre-heating before quenching into water and self-tempering in air after quenching.

Key words: quenching technology; numerical simulation; plastic mould steel

1 引 言

钢淬火的物理模型是耦合温度场、组织场、应力/应变场及淬火工件性能的本构模型, 可以表达成一组偏微分方程及初始条件和边界条件^[1-3]。随着高性能计算机的出现及有限元的发展, 淬火过程中随时间发生变化的温度场、组织场、应力/应变场及工件的性能可以通过解上述的偏微分方程而容易地获得^[4-8]。作者借助计算机对几种不同淬火工艺的温度场和组织场进行耦合数值模拟, 为 718 塑料模具钢大模块设计了一种新的淬火工艺。

2 淬火过程的数学模型

2.1 温度场传热模型

热处理过程中热传导一般是不对称的, 随时间而变化的温度场可以用下列三维偏微分方程及相应的初始条件和边界条件表达:

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

式中 k 、 ρ 、 c_p 分别为材料的热导率、密度、比热容; \dot{q} 为内热源强度, 源于淬火过程中相变产生的潜热, 与相变的类型和相变量有关(见式 14)。

$$\text{初始条件: } T(x, y, z, t=0) = T_0(x, y, z) \quad (2)$$

$$\text{边界条件: } h(T_a - T_s) = k \left(\frac{\partial T}{\partial x} l_x + \frac{\partial T}{\partial y} l_y + \frac{\partial T}{\partial z} l_z \right) \quad (3)$$

$$h = h_c + h_r \quad (4)$$

$$h_r = (T_a^2 + T_s^2)(T_a + T_s) \quad (5)$$

式中 T_s 、 T_a 分别为工件表面温度和环境温度; l_x 、 l_y 、 l_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的方向余弦; h 为综合换

收稿日期: 2003-05-25; 修订日期: 2003-07-14

作者简介: 宋冬利(1976-), 女, 山西太谷人, 博士研究生。

导师: 顾剑峰教授

热系数; h_c 为对流换热系数; h_r 为辐射换热系数; 为表面辐射率; 为 Stefan-Boltzmann 常数,其值为 $5.768 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

由于相变潜热的存在,上述偏微分方程需用非线性有限元方法求解,相应的有限元形式如下:

$$[K]\{T\} + [C]\left\{\frac{\partial T}{\partial t}\right\} = \{F\} \quad (6)$$

式中 $[K]$ 、 $[C]$ 分别为温度刚度矩阵和非稳态变温矩阵。采用向后差分法进行时间离散,式 6 可化为:

$$\left[[K] + \frac{1}{\Delta t}[C] \right] \{T\}_t = \frac{1}{\Delta t}[C]\{T\}_{t-\Delta t} + \{F\} \quad (7)$$

2.2 相变计算模型

相变计算模型以 TTT 转变曲线为依据。因为淬火过程是一个连续冷却的过程,因此在处理中将时间离散为足够小的时间段,使得在此时间内的温度可以看作是恒定值。连续冷却淬火过程就转变为许多瞬间等温过程,而 Scheil 叠加法则解决了这些等温过程的叠加问题。对扩散型相变和瞬时完成的非扩散型相变(马氏体相变)采用不同的计算方法。

对扩散型相变,Scheil 叠加法用来计算孕育期,即确定相变开始时刻:

$$\frac{t_i}{i(T)} = 1 \quad (8)$$

式中 $i(T)$ 为在温度 T 下等温所需的孕育期; t_i 为在温度 T 下等温经历的微小时间段。当在不同温度段的孕育期分数累加等于 1 时,相变开始发生,此时可用 Avrami 方程计算相变量。

$$f = 1 - \exp(-bt^n) \quad (9)$$

式中 b 、 n 为取决于等温温度的系数,与钢的成分及奥氏体化条件有关。

在计算相变量时还需引入虚拟转变时间 t_i^* ,它是指在等温温度 T_i 下形成到上一个等温温度 T_{i-1} 结束时获得的某相体积分数所需的时间。

$$t_i^* = \left[\frac{\ln(1 - f_{i-1})}{b_i} \right]^{1/n_i} \quad (10)$$

在此基础上可计算在温度 T_i 停留时间间隔 t 产生的虚拟转变量:

$$f_i^* = 1 - \exp[-b_i(t_i^* + t)^n] \quad (11)$$

实际的转变量为:

$$f = f_i^*(f_{i-1} + f_{i-1})f_{\max} \quad (12)$$

式中 f_{i-1} 、 f_{i-1} 分别为 $i-1$ 时刻形成的新相和未分解的奥氏体的体积分数; f_{\max} 为在温度 T_i 时新相

的最大转变量。

马氏体相变量的计算采用 Koistinen - Marburger 方程:

$$f = 1 - \exp[-(M_s - T)] \quad (13)$$

式中 M_s 为马氏体开始转变的温度; T 为温度; 为与钢材有关的常数,对大多数钢, $=0.011$ 。

2.3 相变潜热的计算

冷却时奥氏体转变产生的相变潜热 \dot{q} 为:

$$\dot{q} = \frac{H(f_{i+1} - f_i)}{t} \quad (14)$$

式中 H 为奥氏体转变为某相时,单位体积两相之间的热焓差; f_{i+1} 、 f_i 分别为 $i+1$ 、 i 时刻某相的体积分数。

3 淬火模型的有限元数值模拟

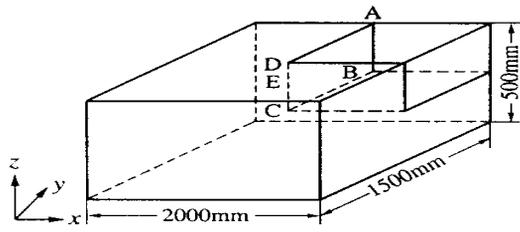
718 塑料模具钢的化学成分见表 1。图 1a 是模拟的大模块的形状及其尺寸。由于模块的对称性,仅取 1/8 模块进行数值模拟,运用有限元法(FEM)将其离散成 1 500 个六面体单元和 2 016 个节点,图 1b 为网格划分形式。考虑到工件的表面温度变化十分剧烈,为了能够进行准确模拟及收敛容易,工件的表面部分被进一步细化。通过大型有限元软件 MSC-Marc 及用户开发的子程序对三种不同的淬火工艺进行了数值模拟。第一种淬火工艺是工件从奥氏体化温度 860 直接淬入水中冷却到室温;第二种工艺为加热 860 空冷 50min 水淬 30min 自回火 50min 水淬 30min 空冷至室温;第三种工艺为加热至 860 空冷 50min 水淬 30min 空冷至室温。

表 1 718 钢的化学成分(质量分数,%)

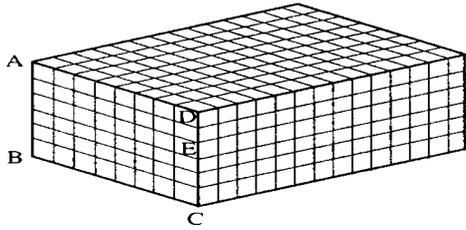
Tab.1 The chemical composition of steel 718 (mass, %)								
C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
0.35	0.75	0.40	0.012	0.007	1.75	0.40	1.14	0.11

4 结果与分析

从图 2、3、4 可知,三种淬火工艺均可使大模块表层获得马氏体和贝氏体的混合组织,而内层则是大量贝氏体(95%以上)加上极少量的马氏体组织(工艺中模块内层全部是贝氏体组织)。对于 2 000mm × 1 500mm × 500mm 的大模块,直接水淬导致模块的表心温差很大(图 2a),很容易形成淬火



(a) 模块的形状及尺寸



(b) 模块的网格划分形式

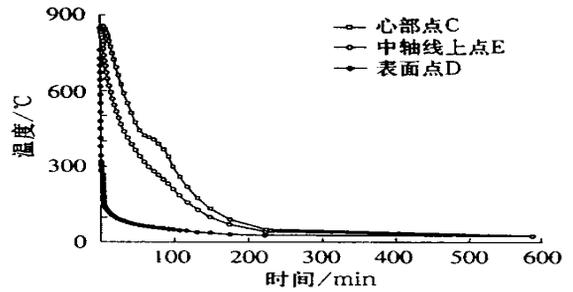
图1 模块尺寸及有限元网格划分

Fig.1 The size of the module and FEM mesh

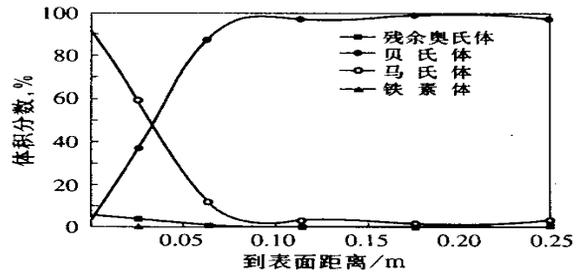
(a) the shape and size of module (b) the FEM mesh

裂纹,而水淬前在空气中预冷有效地减小了整个淬火过程模块的表心温差(图 3a 和 4a),从而可以减小淬裂的可能性。预冷结束后尽管模块表面点 D 的温度下降到 650 左右,但该处并没有发生先共析铁素体、珠光体相变,这是因为 718 钢的淬透性很高,即使是在 TTT 曲线“鼻子尖”(650)处,先共析铁素体、珠光体相变孕育期也长达 698s。另外,水淬后大模块的表层形成了马氏体和少量贝氏体组织,接着将模块从水中提出在空气中冷却,可使刚刚形成的马氏体和贝氏体组织发生自回火,其脆性大大降低,也进一步减小了开裂的可能性。由此可见,工艺、明显优于工艺。

工艺中大模块经空气中自回火处理后,再一次淬入水中,其目的是使其内部过冷奥氏体继续相变。另外,图 3a 中可见第一次水淬结束后,大模块心部温度已经下降到了 540,该温度区间属于过冷奥氏体的稳定区,在此温度区间不会发生先共析铁素体和珠光体相变,因此设计了工艺,即第一次水淬之后直接在空气中冷却到室温。图 4 的模拟结果也进一步证明淬火工艺的合理性。对比工艺、可知,前者可使大模块内层获得少量的马氏体组织,而后者使大模块心部只能得到贝氏体组织,工艺简单、易于操作。当然对于尺寸更大的模块,工艺有可能在其心部发生先共析铁素体和珠光体相变,所以应采用工艺。



(a) 中截面上各点的冷却曲线

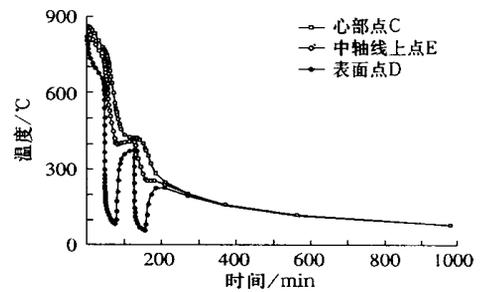


(b) 中截面上从表面到中心的组织分布

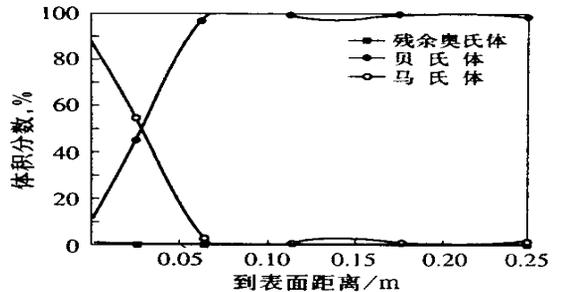
图2 淬火工艺的模拟结果

Fig.2 Simulation results of quenching technology

(a) cooling curves of points on the middle section
(b) microstructure distribution from surface to center of the middle section



(a) 中截面上各点的冷却曲线



(b) 中截面上从表面到中心的组织分布

图3 淬火工艺的模拟结果

Fig.3 Simulation results of quenching technology

(a) cooling curves of points on the middle section
(b) microstructure distribution from surface to center of the middle section

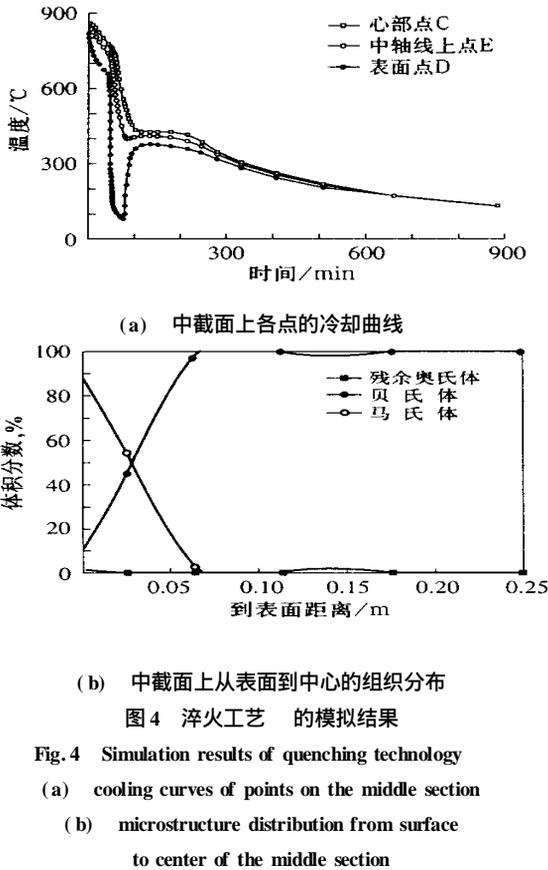


图4 淬火工艺的模拟结果

Fig. 4 Simulation results of quenching technology

(a) cooling curves of points on the middle section
(b) microstructure distribution from surface to center of the middle section

5 结论

(1) 水淬之前在空气中预冷处理对 718 塑料模具钢大模块获得硬度均匀分布以及避免淬火裂纹是非常有效的。

(2) 水淬之后,将大模块从水中提出在空气中自回火处理能够有效地使生成的马氏体和贝氏体组织得到自回火,从而降低了因热应力及相变应力引

起开裂的可能性。

(3) 对于尺寸相对较小的模块可采用空冷预冷水淬 空冷至室温的淬火工艺,而尺寸更大的模块则需要采用空冷预冷 水淬 自回火 水淬 空冷至室温的淬火工艺。

参考文献:

- [1] Kamamoto S, Nishimori T, Knoshita S. Analysis of residual stress and distortion resulting from quenching in large low-alloy steel shafts [J]. Materials Science and Technology, 1985, (1): 798 - 804.
- [2] Denis S, Archambault P. Prediction of residual stress and distortion of ferrous and non-ferrous metals: current and future developments [A]. Proceedings of the 3rd Inter. Conf. On Quenching and Control of Distortion [C]. 1999. 263 - 266.
- [3] Buchmayr B, Kirkaldy J S. Modeling of temperature field and transformation, hardness and mechanical response of low alloy steels during cooling from the austenite region [J]. Journal of Heat Treating, 1990, (8): 127 - 136.
- [4] 胡明娟,潘健生,李兵,等. 界面条件剧变的淬火过程三维温度场的计算机模拟 [J]. 金属热处理学报, 1996, 17 (51): 90 - 97.
- [5] 潘健生,胡明娟,田东,等. 45 钢淬火三维瞬态温度场与相变的计算机模拟 [J]. 热加工工艺, 1998, (1): 1 - 4.
- [6] 田东,胡明娟,潘健生. T8 钢淬火过程三维温度场计算及实验 [J]. 上海交通大学学报, 1998, 32 (2): 109 - 111.
- [7] Fernandes F M B, Denis S, Simon A. Mathematical model coupling phase transformation and temperature evolution during quenching of steels [J]. Materials Science and Technology, 1985, (1): 838 - 844.
- [8] PAN Jian-sheng, LI Yong-jun, LI Ding-qiang. The application of computer simulation in the heat treatment process of a large-scale bearing roller [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 122: 241 - 248.

(上接第 6 页)

(1) 钴基合金等离子喷焊合金层是由细枝晶亚层和粗枝晶亚层所构成,组织特征为亚共晶形态。

(2) 未时效的合金层主要是由以 -Co 固溶体为基,以及分布在其中的 (Cr, Fe)₇C₃ 相构成。时效过程中部分 (Cr, Fe)₇C₃ 相转变成了 Cr₂₃C₆ 相。

(3) 喷焊合金层经 600 × 60h 时效后,不同亚层显微硬度的变化规律不同,细枝晶亚层显微硬度提高约 29%。

参考文献:

- [1] Jon-Ning Aoh Jiann-Cheng Chen. On the wear characteristics of Cobalt-

base hardfacing layer after thermal fatigue and oxidation [J]. Wear, 2001, 250: 611 - 620.

- [2] 罗伟中. 等离子弧堆焊 Co-223A 合金粉末的研制和应用 [J]. 焊接学报, 1997, (2): 42 - 45.
- [3] 苏志东,王德权. 核级阀门堆焊钴基合金工艺的研究 [J]. 阀门, 2000, (5): 15 - 18.
- [4] 陈汉存,刘正义,庄育智,等. 在 45 钢上等离子弧堆焊 Co-Cr 结合层的组织结构 [J]. 金属学报, 1991, (2): A115 - A120.
- [5] 刘政军,季杰,马学智,等. 多元复合强化铁基高温耐磨等离子弧喷焊合金及耐磨机理 [J]. 焊接学报, 1998, (12): 28 - 35.
- [6] 戴华,潘春旭. 激光熔覆工艺对钴基合金气阀密封面覆层组织的影响 [J]. 机械工程材料, 2002, 26 (6): 25 - 27.